



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## Estudio de viabilidad de cajones marítimos con hormigón con fibras

Treball realitzat per:

**Oscar G. Ramos Marquès**

Dirigit per:

**Javier Pablo Ainchil Lavín**

**Antonio Aguado de Cea**

Màster en:

**Enginyeria de Camins, Canals i Ports**

Barcelona, **Septembre 2017**

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

**TREBALL FINAL DE MÀSTER**

# AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer este trabajo a aquellos que me han brindado su apoyo y han hecho posible su realización. Principalmente, a mis tutores Antonio Aguado de Cea y Javier Ainchil Lavín por toda la ayuda incondicional que me han prestado al resolver mis dudas y por proporcionarme toda la información necesaria para llevar a cabo este trabajo.

Por otro lado, me gustaría dar también las gracias a mi familia y a Carolina Añaños por la paciencia que han tenido conmigo a lo largo de estos meses y por las horas que han dedicado a llevar este trabajo a buen puerto.

# Contenido

Resumen.....	i
Abstract .....	ii
1. Introducción y objeto .....	1
2. Estado del conocimiento.....	3
2.1 Cajones portuarios contruidos sobre dique flotante.....	3
2.1.1 Procedimiento constructivo del cajón .....	5
2.1.2 Construcción del muelle o del dique vertical .....	7
2.1.3 Dimensionamiento de los cajones .....	9
2.1.4 Ejemplos .....	14
2.2 Hormigón con fibras .....	17
2.2.1 Anejo 14 EHE-08.....	18
2.2.2. Model Code 2010 .....	24
2.2.3. Durabilidad .....	28
3. Estudio de un cajón ejemplo .....	30
3.1. Geometría y modelo de cálculo del cajón con celdas rectangulares.....	31
3.2. Geometría y modelo de cálculo del cajón con celdas circulares .....	34
3.3. Geometría y modelo de cálculo del cajón con celdas circulares optimizadas .....	37
3.4. Cargas .....	38
3.5. Combinación de acciones.....	55
3.6. Resultados modelo celdas rectangulares.....	56
3.6.1. Criterio de signos.....	56
3.6.2. ELU.....	57
3.6.3. ELS .....	65
3.7. Resultados modelo celdas circulares .....	73
3.7.1. ELU.....	73
3.7.2. ELS .....	81
3.8. Resultados modelo celdas circulares optimizadas.....	89
3.8.1. ELU.....	89
3.8.2. ELS .....	97
1.1.1. Paredes interiores .....	99
1.1.2. Resumen ELS celdas circulares optimizadas .....	102
3.9. Dimensionamiento en ELU .....	102
3.9.1. Pared exterior en el cajón con celdas rectangulares .....	103

3.9.2.	Pared interior en el cajón con celdas rectangulares .....	105
3.9.3.	Pared exterior con espesor $e_1$ en el cajón con celdas circulares.....	107
3.9.4.	Pared exterior con espesor $e_2$ en el cajón con celdas circulares.....	109
3.9.5.	Pared interior con espesor $e_1$ en el cajón con celdas circulares .....	111
3.9.6.	Pared interior con espesor $e_2$ en el cajón con celdas circulares .....	113
3.9.7.	Pared exterior en el cajón con celdas circulares optimizadas .....	115
3.9.8.	Pared interior en el cajón con celdas circulares optimizadas .....	116
3.10.	Dimensionamiento en ELS.....	117
3.10.1.	Pared exterior en el cajón con celdas rectangulares .....	118
3.10.2.	Pared interior en el cajón con celdas rectangulares .....	118
3.10.3.	Pared exterior con espesor $e_1$ en el cajón con celdas circulares.....	119
3.10.4.	Pared exterior con espesor $e_2$ en el cajón con celdas circulares.....	120
3.10.5.	Pared interior con espesor $e_1$ en el cajón con celdas circulares .....	120
3.10.6.	Pared interior con espesor $e_2$ en el cajón con celdas circulares .....	121
3.10.7.	Pared exterior en el cajón con celdas circulares optimizadas .....	122
3.10.8.	Pared interior en el cajón con celdas circulares optimizadas .....	123
3.10.9.	Resumen del dimensionamiento .....	123
3.11.	Modelización de un cajón con función de muelle.....	125
3.11.1.	Cargas de atraque .....	125
3.11.2.	Cargas de amarre .....	128
3.11.3.	Combinación de acciones.....	130
3.11.4.	Resultados cajón muelle .....	132
3.11.5.	Dimensionamiento ELU .....	138
3.11.6.	Dimensionamiento ELS.....	140
3.11.7.	Conclusiones del dimensionamiento del muelle cajón con celdas rectangulares 141	
3.12.	Análisis económico de las diferentes soluciones .....	141
3.12.1.	Solución original .....	141
3.12.2.	Cajón con celdas circulares .....	142
3.12.3.	Cajón con celdas circulares optimizadas.....	142
3.12.4.	Incremento del tamaño de las cartelas exteriores .....	143
3.12.5.	Incremento del espesor de la pared exterior a 0.48 m.....	144
3.12.6.	Incremento del espesor de la pared exterior a 0.75 m.....	144
3.12.7.	Resumen análisis económico .....	145
4.	Conclusiones .....	146
5.	Bibliografía .....	148



Anejo 1 ..... 150

# Resumen

En este TFM se estudia la viabilidad de sustituir la armadura pasiva por fibras metálicas o plásticas en cajones para obras portuarias.

Para ello, en primer lugar, se estudia el procedimiento constructivo de un cajón y las propiedades de los hormigones con fibras. Una vez analizado el estado del conocimiento se procede a escoger un cajón representativo, ya construido con armadura pasiva. El cajón escogido es el cajón tipo 3 del dique este del puerto de Castellón. Este cajón tiene una longitud de 41.27 m, un ancho de 23.85m y su altura total es de 17.50 m. El cajón se analiza mediante un modelo de cálculo 3D con elementos finitos, desarrollado con SAP2000, que permite obtener los esfuerzos. A partir de estos esfuerzos se comprueba si es viable la sustitución de la armadura pasiva en los tabiques, tanto interiores como exteriores, evaluando los flexores y cortantes últimos (ELU) del hormigón con fibras, obteniéndose el valor necesario de  $f_{R3k}$ . Se determina también la fisuración en Estado Límite de Servicio para, a partir de una abertura de fisura de 0,2 mm, obtener el valor necesario de  $f_{R1k}$ . Este proceso se realiza primero para un cajón con celdas cuadradas, después para un cajón de mismas dimensiones interiores y exteriores pero con celdas circulares y por último para un cajón con celdas circulares con las mismas dimensiones exteriores pero con el interior optimizado para disminuir el volumen de hormigón necesario.

En el caso en que los esfuerzos exijan resistencias a la flexotracción y, en consecuencia, cuantías por encima de las razonables, como sucede en cajones con celdas rectangulares, se procede al incremento de los espesores y a la evaluación de dimensiones de cartelas. También se ha diferenciado entre cajones destinados a diques y cajones destinados a muelles al estar solicitados por acciones distintas.

Igualmente se ha estudiado la posibilidad de utilizar hormigón con fibras plásticas, las cuales desarrollan valores de  $f_{R1k}$  y  $f_{R3k}$  máximos cercanos a los que desarrollan las cuantías mínimas de fibras de acero.

Finalmente se realiza una comparación de mediciones y de presupuesto de las diferentes soluciones planteadas, a partir de precios reales de mano de obra y materiales.

De todo el estudio se extraen conclusiones que permiten afrontar el diseño de estos elementos sin armadura convencional.

# Abstract

This Master Thesis studies the feasibility of replacing the conventional reinforcement by steel or plastic fibers in maritime caissons.

Firstly, a literature review on the constructive procedure of a caisson and the properties of fiber reinforced concrete is developed. Then, a representative caisson, already constructed with conventional reinforcement, is chosen. The caisson breakwater chosen is the type 3 of project for the east breakwater of the port of Castellón. This caisson has a length of 41.27 m, a width of 23.85 m and a total height of 17.50 m. The caisson has been analyzed by a 3D finite element model developed with SAP2000, to obtain the internal forces. From this internal forces, it is possible to verify if the substitution of the conventional reinforcement is feasible, evaluating both the ultimate limit strength (ULS) of the fiber concrete in bending and shear, where the necessary value of  $f_{R3k}$  is obtained. Cracking is also determined in Service Limit State (SLS) to obtain the required value of  $f_{R1k}$  from a crack width of 0.2 mm. This process is done first for the caisson with square cells, then for the caisson of the same internal and external dimensions but with circular cells and finally for a caisson with circular cells with the same exterior but with the interior optimized to decrease the volume of concrete required.

If the required ultimate tensile strength of the concrete, and hence, the amount of fibers, are larger than the usual ones, as for instance for caissons with rectangular cells, an increase of the depths of the walls or the use of gussets are studied. In addition, as the loads for caissons for breakwaters and the ones used for docks are different, both have been studied.

Moreover, the study includes the possibility of using plastic fiber reinforced concrete, which develops maximum values of  $f_{R1k}$  y  $f_{R3k}$  close to those developed with the minimum amount of steel fibers.

Finally, the amount of materials and the cost are compared for the different solutions, based on real prices of labor and materials.

Conclusions on the feasibility of designing maritime caissons with plastic and steel fiber reinforced concrete are included.

# 1. Introducción y objeto

La utilización de cajones prefabricados de hormigón para la ejecución de muelles y diques verticales portuarios está muy extendida en España. De hecho, nuestro país es uno de los principales constructores de cajones para dichos usos junto a Italia y Japón. El dominio de la tecnología ha permitido que las empresas constructoras españolas tengan un importante mercado exterior de estos elementos. Esto ha llevado a que el Ministerio de Fomento haya publicado un “Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias” que constituye una obra de absoluta referencia en este campo.

A diferencia de Japón, en España se utilizan diques flotantes para la ejecución en el propio mar de los cajones. En Japón se suelen construir sobre el terreno y proceder a su botadura, como si de un buque se tratara. En la técnica de diques flotantes se utilizan encofrados deslizantes por lo que si se desea evitar juntas frías y alcanzar altas producciones es inevitable el trabajo continuo 24 horas.

Esta producción continua significa no sólo un vertido de hormigón, sino un ferrallado sin interrupción. Dicho ferrallado viene además dificultado por la complejidad del encofrado interior de los cajones con muchos elementos de cuelgue y rigidización, la escasez de espacio disponible, la dificultad de suministro de armadura, etc.

El comportamiento en servicio de los cajones es básicamente como elemento masivo, trabajando por gravedad. Por tanto, el armado de las celdas interiores es necesario para esfuerzos durante ejecución (traslado, fondeo y relleno del cajón). El objeto del trabajo es estudiar la posibilidad de sustitución, total o parcial, de la armadura convencional de los cajones pasando de una estructura de hormigón armado a una de hormigón reforzado con fibras de acero. Dicha sustitución tendría ventajas constructivas claras, disminuyendo plazos y costes.

Para ello se plantea, como objetivos específicos:

- a. Realizar un estudio del estado del conocimiento en cuanto a la técnica de la construcción de cajones mediante dique flotante y en cuanto a hormigón reforzado con fibras.
- b. Seleccionar un cajón tipo, real, y desarrollar un análisis estructural mediante elementos finitos y un dimensionamiento mediante hormigón reforzado con fibras, con o sin armadura convencional.
- c. Comparar diversos tipos de cajones como son: con células rectangulares y circulares, de muelle o de dique
- d. Obtener unas mediciones para el caso de hormigón con fibras y compararlas con las del caso de hormigón armado
- e. Extraer conclusiones sobre la viabilidad tanto técnica como económica de ejecutar los cajones con hormigones reforzados únicamente con fibras.

## 2. Estado del conocimiento

El capítulo dedicado al análisis del estado del conocimiento se ha dividido en dos subcapítulos. El primero se corresponde con la técnica constructiva y el análisis de cajones construidos sobre dique flotante. El segundo versa sobre el hormigón reforzado con fibras, plásticas o metálicas.

### 2.1 Cajones portuarios construidos sobre dique flotante

Tal y como se ha comentado en la introducción, la mayoría de los cajones portuarios ejecutados en España se construyen sobre diques flotantes. Estos diques flotantes están constituidos por una pontona y unos pies derechos. Tanto la pontona como los pies pueden rellenarse de agua de forma que se controla la porción de dique sumergida a fin de darle estabilidad. Sobre esta estructura básica se sitúa una celosía tridimensional de acero, denominada paraguas, que proporciona rigidez a las distintas partes del encofrado (Figura 1). Al dique flotante se le conoce, de forma coloquial, como cajonero.



Figura 1 – Vista general de un dique flotante durante la ejecución de un cajón. La pontona está sumergida.

Este encofrado tiene, típicamente, una altura entre 1,0 y 1,5 m y encofra tanto el contorno exterior del cajón como las celdas o cántaras interiores. Estas celdas o cántaras pueden ser circulares o rectangulares y son las que, en primer lugar se rellenan parcialmente con agua para dar estabilidad durante construcción y transporte, después se rellenan totalmente con agua durante el fondeo y, por último, se rellenan con material granular para materializar el muelle o dique vertical.

El encofrado deslizante asciende merced a su apoyo en barras de trepa, que se van recreciendo conforme se ejecuta el cajón. La velocidad de trepa es de aproximadamente unos 20 cm/h. Con esta velocidad, el tiempo medio desde el hormigonado hasta el desencofrado y, por tanto, hasta que el hormigón deba resistir su peso propio y mantener su forma es de unas 6 horas. Unido a que es necesario facilitar el deslizado y que debe resistir la acción erosiva de oleaje (en el caso de diques) y de los cloruros, hace que el hormigón utilizado tenga unas características muy específicas para esta aplicación.

Es la circunstancia del deslizado la que hace necesaria la ejecución en continuo del cajón, pues se desea también evitar juntas frías. Dicha ejecución continua exige un trabajo en tres turnos, cada uno formado por un equipo de hormigonado y otro de ferrallado. Estos equipos deben moverse sobre el encofrado de las cántaras, el cuál pende del paraguas mediante tirantes y, además, se encuentra arriostrado mediante yunques (Figura 2). Todos estos elementos dificultan, sobremanera, el trabajo de ferrallado de las paredes de las cántaras, que son de pequeño espesor. Por tanto, los rendimientos alcanzados son bajos y, en consecuencia, los costes elevados.



*Figura 2 – Vista del encofrado de las celdas, con un yunque en primer plano y la ferralla de un tabique interior*

### 2.1.1 Procedimiento constructivo del cajón

El procedimiento constructivo tiene las siguientes fases (Figura 3, Figura 4 y Figura 5):

1. Ascensión del dique flotante hasta que emerge la pontona. Montaje de la armadura de solera y encofrado convencional perimetral. Hormigonado de la solera y ejecución de junta con llave de cortante para el arranque de alzados.
2. Montaje de barras de trepa. Bajada del encofrado. Inicio del deslizado mediante hormigonado y ferrallado continuo.
3. Durante el proceso de deslizado se va sumergiendo tanto el dique flotante como el cajón inyectando agua, respectivamente, en la pontona y en las celdas o cántaras. Esta inmersión parcial, gracias al lastre, es necesaria para asegurar la estabilidad del conjunto.
4. Una vez finalizado el deslizado se procede a la botadura del cajón. Para ello, en primer lugar, se iza el paraguas merced a los cables de los que pende de las torres de los pies derechos. El paraguas arrastra al encofrado deslizante. Se retiran las barras de trepa. Se inyecta agua en los pies derechos procediéndose a la inmersión del dique flotante. Con ello, el cajón queda flotando de forma independiente y puede ser remolcado mediante remolcador a su posición de fondeo definitiva o a un fondeo provisional.



El proceso se puede apreciar en la Figura 3:

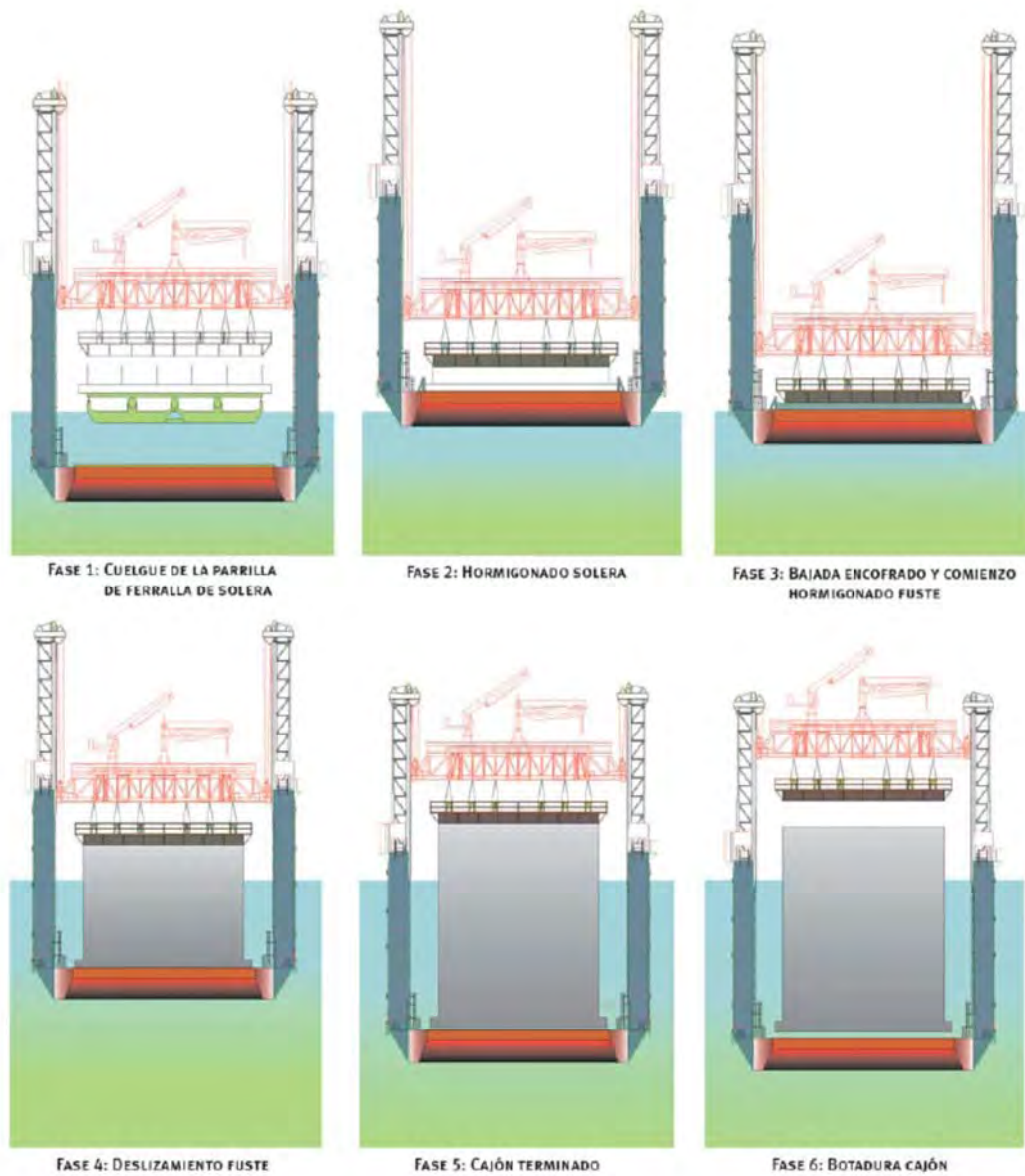


Figura 3 – Proceso de ejecución de un cajón mediante dique flotante



Figura 4 – Vista del dique flotante durante la ejecución de un cajón



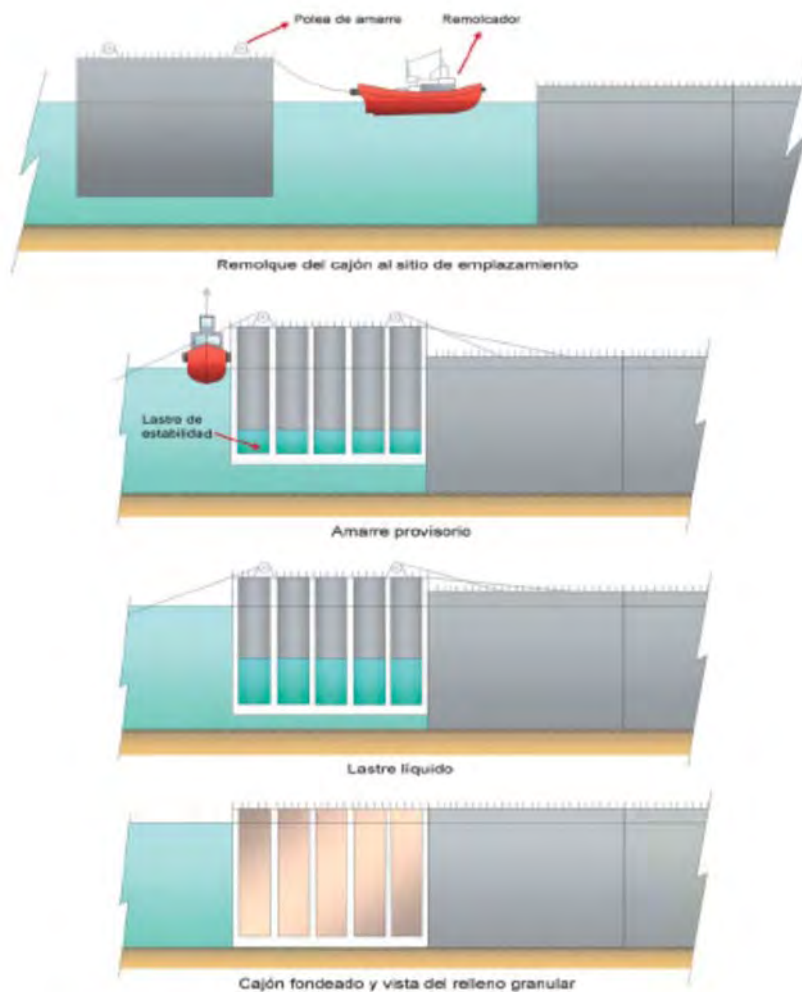
Figura 5 – Vista superior durante el hormigonado de un cajón

### 2.1.2 Construcción del muelle o del dique vertical

Una vez construido el cajón se procede a la ejecución del muelle o dique vertical (Figura 7). Para ello se procede según las siguientes fases:

1. Remolque del cajón a la posición de fondeo definitivo. Durante esta fase las celdas o cántaras están parcialmente rellenas de agua para asegurar la estabilidad. Con el mismo fin, las cántaras deben estar todas conectadas para tener igual nivel de agua en todo el cajón.
2. Posicionamiento del cajón previo al fondeo. Para ello se utilizan amarras a los cajones ya fondeados, a muertos o anclas en el fondo o a remolcadores. El posicionamiento se asegura mediante GPS y se accionan las amarras mediante trácteles o cabrestantes para mover el cajón y posicionarlo.
3. Lastrado total de las celdas o cántaras con agua para proceder al fondeo.
4. Verificación de la posición final. Si fuera necesaria una corrección se vuelve a reflotar el cajón, extrayendo agua de las celdas, y se vuelve a proceder a su posicionamiento.
5. Una vez en posición definitiva se rellenan las celdas con material granular y se ejecuta una losa de hormigón armado atando las cabezas de los cajones para proporcionar monolitismo.

Estas fases se encuentran reflejadas en la siguiente figura:



*Figura 6 – Fases de fondeo de un cajón*





Figura 7 – Ejemplo de dique vertical durante construcción

### 2.1.3 Dimensionamiento de los cajones

El dimensionamiento de los cajones viene regido por el Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias del Ministerio de Fomento (Ministerio de Fomento, 2006) y por las ROM (Recomendaciones de Obras Marítimas, editadas por puertos del Estado), así como por la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008).

En los siguientes apartados se resumen sus aspectos más importantes.

#### 2.1.3.1 Acciones a considerar

##### Acciones permanentes

- **Peso propio:** Se considera el peso específico del hormigón seco. Por tanto, su valor es de  $25 \text{ KN/m}^3$ . El efecto del empuje de agua se considera como una acción independiente, no utilizando el peso específico sumergido.

- Empuje de Arquímedes: Como se ha indicado, se tiene en cuenta como una acción independiente, aunque obviamente ligada al peso propio. Se evalúa considerando un peso específico del agua de 10,1 KN/m<sup>3</sup> y se considera una presión repartida uniformemente en la base del cajón.
- Cargas muertas: Son cargas muertas el peso de la superestructura y los posibles rellenos de tierra sobre el cajón.
- Empuje hidrostático: Como se ha indicado anteriormente se tomará como peso específico del agua 10,1 KN/m<sup>3</sup>. Como acciones existen el empuje hidrostático del mar, el del agua del interior de las celdas, así como el peso de dicha agua. También se considerará el peso del agua sobre las zapatas (eventual voladizo de la solera por el intradós de los alzados).
- Peso de las tierras: Si se trata de un muelle, uno de los lados del cajón está aterrado por lo que será necesario considerar el peso de tierras, con su densidad sumergida hasta el nivel del mar, sobre la eventual zapata.
- Acciones verticales debidas a las tierras del material ensilado: Las dimensiones de las celdas hacen que se asimilen a un silo y que, en consecuencia, presenten el denominado efecto silo. Este efecto consiste en que todo el peso del material de relleno no se transmite al fondo del cajón, sino que una parte apreciable del mismo se transmite por rozamiento a las paredes de hormigón. De esta forma, las paredes presentan un axil de compresión que es favorable a su resistencia y que no debe ser despreciado. Denominando  $P_r$  a la presión vertical sobre el fondo del cajón y  $P'_r$  presión vertical de rozamiento debida al empuje de tierras, se tiene que

$$P_r = \gamma' Z_0 (1 - e^{z/z_0}) + q e^{z/z_0}$$

$$P'_r = \lambda \gamma' Z_0 (1 - e^{z/z_0}) \operatorname{tg} \delta + \lambda q e^{z/z_0} \operatorname{tg} \delta$$

$$Z_0 = \frac{A}{u \lambda \cdot \operatorname{tg} \delta}$$

donde

- |    |   |
|----|---|
| z  | Profundidad desde la cara superior del terreno hasta el punto en que se evalúa el empuje.   |
| λ  | coeficiente de empuje horizontal. Para rellenos granulares se adopta un valor de 0,5 que corresponde al empuje al reposo para un suelo de ángulo de rozamiento interno de 30° |
| γ' | peso específico sumergido del material de relleno, normalmente 10 KN/m <sup>3</sup>   |
| δ  | ángulo de rozamiento terreno-estructura. Normalmente se adopta el 75% del ángulo de rozamiento interno, 30° para rellenos arenosos.   |
| A  | área de una celda o cántara.  |

- u      perímetro de una celda o cántara
- q      sobrecarga o peso de terreno por encima de las celdas.

#### Acciones permanentes de valor no constante

- Acciones horizontales del relleno de las celdas: Al igual que en las acciones verticales es preciso tener en cuenta el efecto silo. Así la presión horizontal tiene por expresión la siguiente:

$$e_r = \lambda \gamma' Z_0 (1 - e^{-z/z_0}) + \lambda q e^{-z/z_0}$$
$$Z_0 = \frac{A}{u \lambda \cdot \tan \delta}$$

donde las variables son las mismas utilizadas en el apartado anterior.

- Empuje de tierras en trasdós de muro: Cuando el cajón se utiliza como muelle portuario es necesario considerar el empuje del relleno en su trasdós.

#### Acciones variables

- Sobrecargas de uso y explotación: Son las acciones a las que será sometido el cajón durante la explotación de la obra, tales como manipulación de mercancías, tráfico vial y/o ferroviario, sobrecargas de uso, acciones de amarre de buques,...

#### Acciones climáticas

- Oleaje: La acción del oleaje viene definida en la ROM 0.2-90 (Puertos del Estado, 1990) y en ROM 0.3-91 (Puertos del Estado, 1991). Se distinguen dos hipótesis de carga:
  - a) Acción del oleaje al paso de la cresta de la ola en fase de servicio
  - b) Acción del oleaje al paso del seno de la ola en fase de servicio
- Temperatura: No es una acción importante en elementos de este tipo, con paredes delgadas.

#### Acciones extraordinarias

- Sismo: Es de aplicación la norma sismorresistente. Sin embargo, dado que la acción sísmica sólo afecta a la estabilidad global del cajón, no a su estructura, no es de aplicación para el estudio que aquí se desarrolla.
- Oleaje extraordinario: Se considera oleaje extraordinario aquél cuyo periodo de retorno es de 500 años. Presenta, al igual que el oleaje, dos hipótesis de carga que corresponden con la acción de la cresta y del seno de la ola.

### 2.1.3.2 Valores de las acciones, estados límites y combinaciones de acciones

Los valores característicos de las acciones, los coeficientes de mayoración en estados límites últimos y de servicio y las combinaciones de acciones son las definidas por la EHE-08.

En el *Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias* (Ministerio de Fomento, 2006) se encuentra la tabla de combinación de acciones en ELU, que se adjunta a continuación:

Situación Persistente o transitoria	Comb	$P_0, P_a$	$P_1, P_{1z}$	$E_a$	$P_r, P'_r$	$E_r$	$P_t$	$E_T$	$E_{co}, P_{co,1}$	$E_{10}, P_{10,1}$	$P_{sc}$
Fase de flotación ▲+	ELU1	1,00/ 1,35(*)	1,35	1,35							
Fase de Fondeo ▲	ELU2	1,00/ 1,35(*)	1,35	1,35							
Presión sobre una celda resto vacío +	ELU3					1,50					
MUELLES (aguas abrigadas)											
Servicio ▲◆	ELU4	1,00/ 1,35(*)	1,00/ 1,35(*)	1,35	1,00/ 1,35(*)	1,50	1,00/ 1,35(*)	1,00/ 1,50(*)			1,50
DIQUES											
Presión Ext. Seno Oleaje ▲◆	ELU5	1,00/ 1,35(*)	1,00/ 1,35(*)	1,35	1,00/ 1,35(*)	1,50	1,00/ 1,35(*)	1,00/ 1,50(*)		1,50	$\psi_0 \times$ 1,50(**)
Oleaje ▲◆	ELU6	1,00/ 1,35(*)	1,00/ 1,35(*)	1,00	1,00/ 1,35(*)	1,00	1,00/ 1,35(*)	1,00/ 1,50(*)	1,50		$\psi_0 \times$ 1,50(**)
$P_0$	Peso Propio del cajón (solera y zapatas, $P_{oc}$ , y paredes $P_{op}$ ). $P_0 = P_{oc} + P_{op}$ .										
$P_a$	Empuje ascensional del agua (empuje de Arquímedes).										
$P_1$	Peso del agua contenida en las celdas del cajón.										
$P_{1z}$	Peso del agua que gravita sobre las zapatas.										
$E_a$	Empuje Hidrostático.										
	Empuje de agua en trasdós de muelle o dique.										
$P'_r$	Peso del Relleno que se transmite por el fuste (Efecto Silo).										
$P_r$	Peso del Relleno de tierras que se transmite por la superficie de la celda (Efecto Silo).										
$E_r$	Acciones horizontales (Empuje) debidas al Relleno (Efecto Silo).										
$E_T, P_t$	Empuje de Tierras sobre trasdós de muelles o diques trasdosados. Peso de tierras sobre zapata.										
$E_{so}$	Seno de Oleaje (Temporal de diseño).										
$P_{so,1}$	Sub-Presión hidrodinámica debida al paso del seno de la ola.										
$E_{co}$	Cresta de Oleaje (Temporal de diseño).										
$P_{co,1}$	Sub-Presión hidrodinámica debida al paso de la cresta de la ola.										
$P_{sc}$	Sobrecarga de uso.										
Leyenda	<p>▲ Posible estado crítico para paredes exteriores.</p> <p>+ Posible estado crítico para paredes interiores.</p> <p>◆ Posible estado crítico para la cimentación.</p> <p>(*) A efectos del cálculo de la solera, resulta necesario considerar ambas posibilidades. En el caso de acciones debidas al terreno se mayorarán o minorarán simultáneamente los efectos verticales y horizontales.</p> <p>(**) Se da por supuesto que la acción del oleaje es predominante, siendo ésta la situación más habitual.</p>										

Tabla 2-1. Combinación de acciones en ELU

### 2.1.3.3 – Materiales

Los valores de cálculo de la resistencia de los materiales se obtendrán, tal como define la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008), a partir de los valores característicos, aplicando los siguientes factores de minoración de resistencias.

Situación de proyecto	Hormigón armado	Hormigón reforzado con fibra	Acero para armar
Persistente o transitoria	1,5	1,5	1,15
Accidental	1,3	1,3	1

Tabla 2-2. Coeficientes de minoración de los materiales

#### 2.1.3.4 – Análisis Estructural

El análisis estructural se puede realizar dividiendo los cajones en elementos primarios como serían solera, tabiques interiores y exteriores y suponiendo condiciones de contorno que permiten asimilar su comportamiento individual al comportamiento como elemento del cajón. Esta aproximación simplificada es la propuesta en el Manual de Diseño y Ejecución de Cajones (Ministerio de Fomento, 2006).

Si se utiliza esta aproximación el análisis se puede dividir en las siguientes fases.

a. Análisis durante fases constructivas:

- Tabiques exteriores: El comportamiento fundamental de los tabiques es de flexión horizontal. Esta flexión se evaluará mediante la modelización de una rebanada horizontal de cajón, sometida a acciones simétricas, en el caso de diques, o asimétricas en el caso de muelles. Esta rebanada se modelizará mediante barras para celdas rectangulares y en el caso de celdas circulares se puede optar entre un modelo de barras conservador o un modelo de elementos finitos. Para obtener el comportamiento vertical, que es secundario excepto en el arranque de los tabiques con la solera, se modelizan éstos como una losa empotrada en la solera y en los tabiques contiguos perpendiculares.
- Solera: La solera se estudiará como losas individuales empotradas en los tabiques interiores y exteriores que las delimitan. Bastará comprobar la que tenga mayor sollicitación.

b. Análisis en servicio:

- Muelle. En el caso de que el cajón constituya un muelle portuario no es necesaria la comprobación en servicio.
- Dique. En este caso es necesario analizar los tabiques exteriores e interiores frente a la acción del oleaje. Para ello, en caso de cajón con aligeramientos cuadrados es preciso estudiar una sección en I empotrada en la solera y solicitada por las cargas horizontales correspondientes a la anchura de una celda de cajón, concentrada en el alma de la I.



Otras posibilidades son el desarrollo de modelos de elementos finitos 3D en los que se pueden utilizar elementos tipo placa o elementos tipo sólido. Con estos modelos se puede obtener unos esfuerzos más precisos, y son los que se utilizarán en este TFM.

#### 2.1.4 Ejemplos

A continuación se presentan ejemplos de muelles y diques ejecutados con cajones.

##### Muelle para cruceros en el puerto del Rosario, Fuerteventura

El muelle para cruceros está formado por 8 cajones con celdas rectangulares de 43.40 metros de eslora, 10.05 metros de manga y 12.50 metros de puntal. Las celdas son cuadradas con unas dimensiones de 4.40m x 4.40 metros.

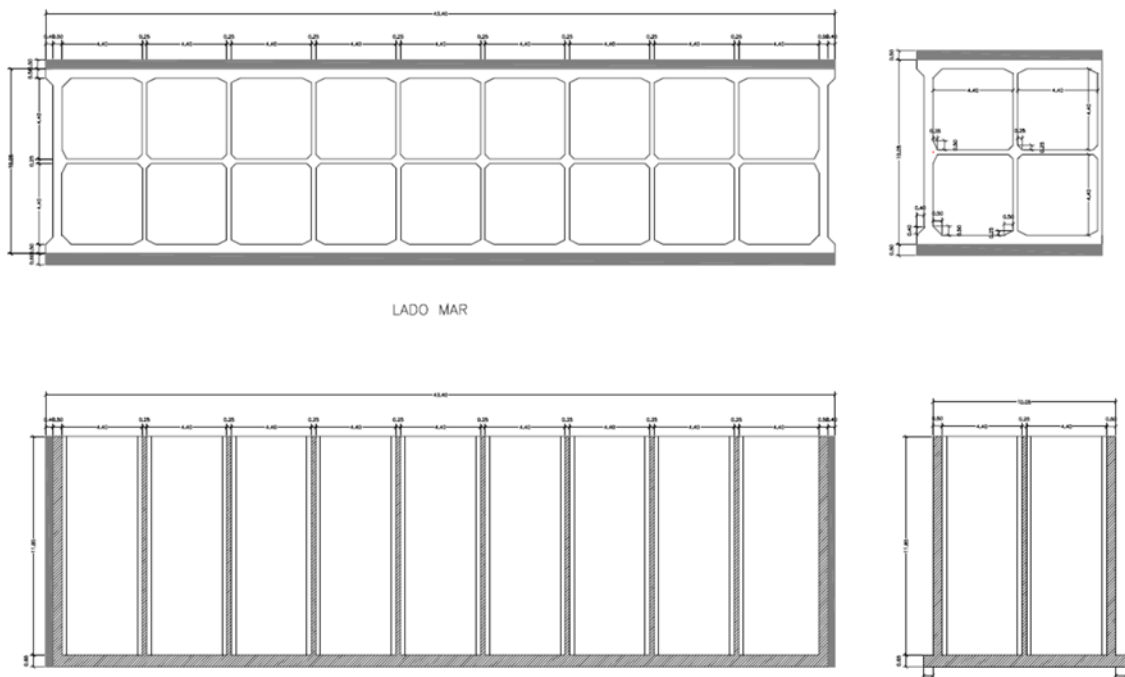


Figura 8 – Cajón puerto del rosario

##### Ampliación del muelle de la química en el puerto de Tarragona

El cajón tipo en este caso es un cajón con celdas rectangulares, de 32 metros de eslora, 16.75 de manga y 17.70 de puntal. Las celdas en su mayoría son cuadradas con una dimensión de 3.80, excepto en los bordes que son rectangulares y hacen 3.80 x 2.95 metros.

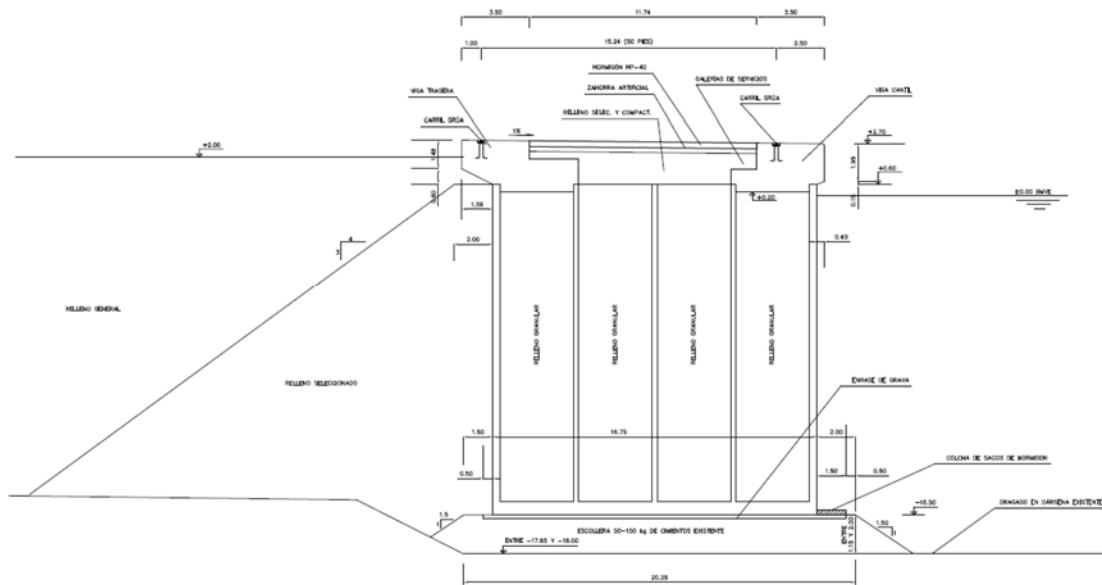


Figura 9 – Corte de un cajón en el puerto de Tarragona

### Terminal mixta Ro-ro Lo-lo en el puerto de Palma de Mallorca

El cajón tipo en este caso es un cajón con celdas rectangulares, de 28.40 metros de eslora, 12.13 de manga y 14 de puntal. Las celdas son cuadradas con una dimensión de 3.20 metros.

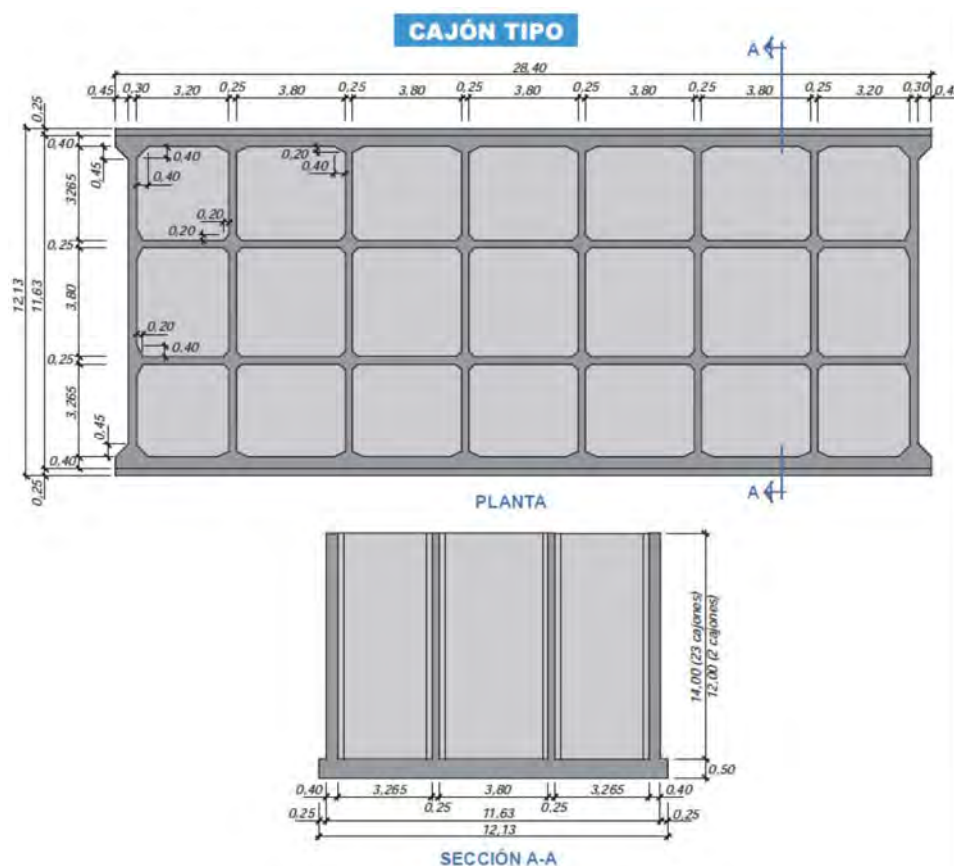


Figura 10 – Sección tipo de la Terminal mixta



*Figura 11 – Detalle de la esquina del muelle*

#### Dique en el puerto de Barcelona

En este caso las celdas de los cajones son circulares.



*Figura 12 – Cajón con celdas circulares en el puerto de Barcelona*

## 2.2 Hormigón con fibras

Las fibras son tiras cortas de un material específico, a menudo acero, que mezcladas en el hormigón pueden ser una alternativa a las armaduras tradicionales de barras de acero.

El hormigón con fibras se puede definir como un material compuesto hecho de cemento Portland, áridos, agua y un pequeño porcentaje de fibras distribuidas aleatoriamente con el objetivo de mejorar una o varias de las propiedades del hormigón. Estas fibras se añaden al hormigón y se distribuyen uniformemente en la matriz de cemento. La geometría y material de las fibras determina su eficiencia.

Su uso se inició en pavimentos pero actualmente se está generalizando a otros elementos y tipos estructurales como tubos (De la Fuente, 2011) y viaductos (Baños, 2014).

El concepto del hormigón con fibras es similar al hormigón armado con barras de acero, ya que ambos estabilizan las fisuras creadas por las tensiones de tracción. En lugar de usar unas pocas barras de acero orientadas en la dirección adecuada, el hormigón con fibras está formado por gran cantidad de pequeñas fibras sin orientar que cosen las fisuras. En la figura Figura 13 se presenta un pequeño esquema de cómo trabajan las fibras en un estado de tracción pura. Si se produce la fisuración del hormigón en el caso de la armadura tradicional la rotura será frágil con una gran abertura al generarse una rótula; en cambio en el hormigón con fibras la rotura es dúctil al verse traccionadas fibras a lo largo de todo el labio de fisura, por lo que el fallo de la estructura no es inmediato. Por tanto, las fibras mejoran el comportamiento del hormigón frente a microfisuras, ya que aumentan la resistencia frente la fisuración de la matriz de cemento, a la vez que una vez se ha producido la fisura impiden el ensanchamiento de la fisura, es por esto que la rotura es dúctil.

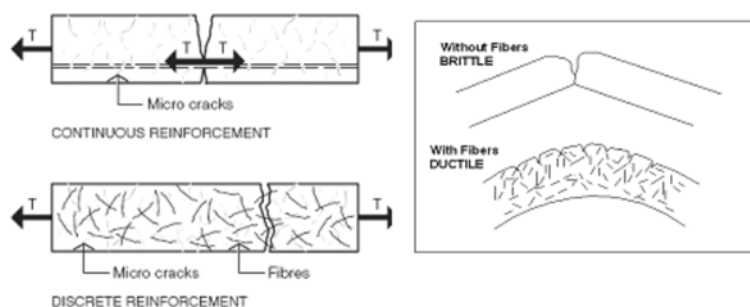


Figura 13 – Comportamiento de las fibras

Las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones con fibras dependen de varios factores: el material de las fibras, la forma de las fibras, la cantidad de fibras que se añade y la composición de la mezcla de hormigón. Es necesario asegurar una distribución uniforme de las fibras en el hormigón y asegurar que estén bien cubiertas con cemento.

Las fibras de acero están disponibles en varios tamaños y formas. Las fibras se pueden fabricar a partir de alambre de acero, cortadas de placas delgadas o cortadas de bloques de acero. Aparte de las fibras rectas, se han desarrollado numerosas fibras con diferentes formas para aumentar

la resistencia a la tracción. Algunos fabricantes modifican la forma de la parte central mientras que otros modifican la forma de las puntas de las fibras.

La caracterización de las fibras depende, aparte de su forma, del diámetro de las fibras que varía entre 0.15 y 1.5 mm, la longitud de las fibras que es entre 40 y 150 veces el diámetro, longitud de desarrollo, diámetro equivalente, esbeltez y área transversal.

En el hormigón con fibras las fibras están distribuidas de manera homogénea en toda la sección, por lo que aparte de estar presentes en las zonas de tracción también se encuentran en zonas de compresión. Como las fibras son mucho más pequeñas que las barras de armado actúan en una escala mucho menor; en general las fibras realizan dos funciones principales:

- Refuerzo de la matriz a nivel micro, que es la resistencia a las micro fisuras proporcionada por las fibras orientadas al azar. Las fibras con alta rigidez proporcionan una mayor resistencia contra la fisuración.
- Refuerzo del hormigón a nivel macro, que significa que después de la fisuración del hormigón las fibras presentes en la fisura transmiten las tensiones de tracción entre ambos lados de la fisura. El comportamiento de las fibras en el nivel macro es un factor muy importante en estado post fisuración, especialmente respecto a la mejora de la tenacidad del hormigón.

En España el uso de hormigón con fibras viene reglado por el anejo 14 de la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 08).

### 2.2.1 Anejo 14 EHE-08

En este anejo se definen los hormigones reforzados con fibras (HRF) como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. La aplicación de estos hormigones puede ser con finalidad estructural o no estructural. El empleo de fibras en el hormigón tiene finalidad estructural cuando se utiliza su contribución en los cálculos relativos a alguno de los estados límite últimos o de servicio y su empleo puede implicar la sustitución parcial o total de armadura en algunas aplicaciones. Se considerará que las fibras no tienen función estructural cuando se incluyan fibras en el hormigón con otros objetivos como la mejora de la resistencia al fuego o el control de la fisuración.

En cada plano de la estructura deberá figurar un cuadro de tipificación de los hormigones incluyendo las condiciones adicionales para los hormigones con fibras, y en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares se deberá incluir aquellas características adicionales al hormigón con fibras, así como los métodos de ensayo para su verificación y los valores que deban alcanzar dichas características. En todo caso deberá indicarse una propuesta de dosificación con los siguientes datos:

-Dosificación de fibras en  $\text{kg/m}^3$ .

-Tipo, dimensiones (longitud, diámetro efectivo, esbeltez), forma y resistencia a la tracción de la fibra (en  $\text{N/mm}^2$ ), en el caso de las fibras con finalidad estructural.

Los hormigones se tipificarán de acuerdo con el siguiente formato:

T – R / f-R1-R3 / C / TM-TF / A



donde:

T: Indicativo que será HMF en el caso de hormigón en masa, HAF en el caso de hormigón armado y HPF en el caso de hormigón pretensado.

R: Resistencia característica a compresión especificada, en  $\text{N/mm}^2$ .

f: Indicativo del tipo de fibras que será A en el caso de fibras de acero, P en el caso de fibras poliméricas y V en el caso de fibra de vidrio.

R1, R3: Resistencia característica residual a flexotracción especificada  $f_{R,1,k}$  y  $f_{R,3,k}$ , en  $\text{N/mm}^2$ .

C: Letra inicial del tipo de consistencia.

TM: Tamaño máximo del árido en milímetros.

TF: Longitud máxima de la fibra, en mm.

A: Designación del ambiente.

En el caso de hormigones designados por dosificación se recomienda el siguiente formato:

T - D - G / f / C / TM / A

donde G es el contenido de fibra, en  $\text{kg/m}^3$  de hormigón, prescrito por el peticionario. El resto de los parámetros tiene el significado que se indica en el Articulado. En este caso deberá garantizarse que el tipo, dimensiones y características de las fibras coincidan con los indicados en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

### *Coefficientes parciales de seguridad*

Para los Estados Límite Últimos y para los Estados Límite de Servicio se opta por mantener los mismos coeficientes parciales de seguridad dados en la EHE-08(Tabla 15.3), ya que se entiende que la incorporación de fibras en condiciones usuales no modifica las incertidumbres que conducen a la estimación de dichos valores.

En cuanto al cálculo de los estados límite últimos la norma indica:

### *Estado Límite de Agotamiento frente a solicitaciones normales*

#### Hipótesis básicas

El cálculo de la capacidad resistente última en las secciones en las que las fibras desempeñen función estructural se efectuará considerando como diagrama de cálculo a tracción alguno de los que se definen a continuación:

-Diagrama rectangular: De forma general se aplicará el diagrama de la Figura 14 caracterizado por la resistencia residual a tracción de cálculo  $f_{ctR,d}$ :

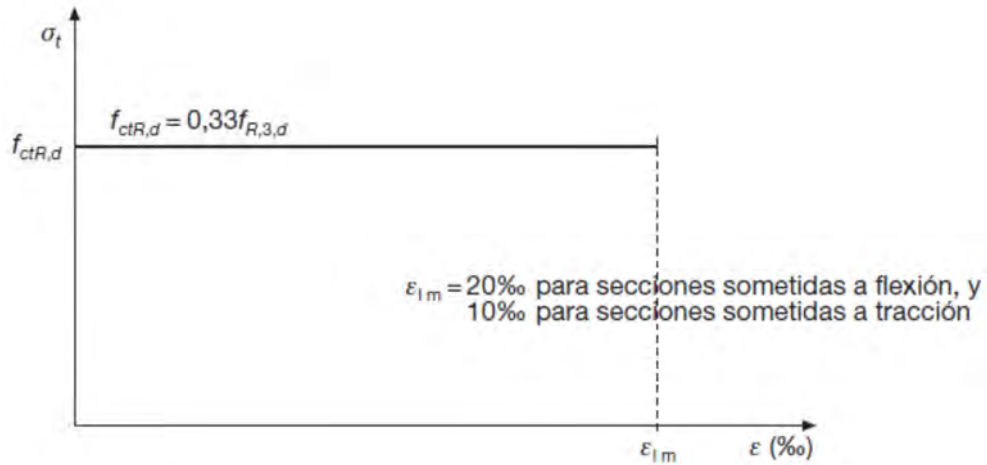


Figura 14 – Diagrama del cálculo rectangular

-Diagrama multilíneal: Para aplicaciones que exigen un cálculo ajustado, se propone el diagrama tensión deformación de la Figura 15, definido por una resistencia a tracción de cálculo  $f_{ct,d}$  y de las resistencias residuales a tracción de cálculo  $f_{ctR1,d}$ ,  $f_{ctR3,d}$  asociadas a sendas deformaciones  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$  en el régimen post-pico, donde:

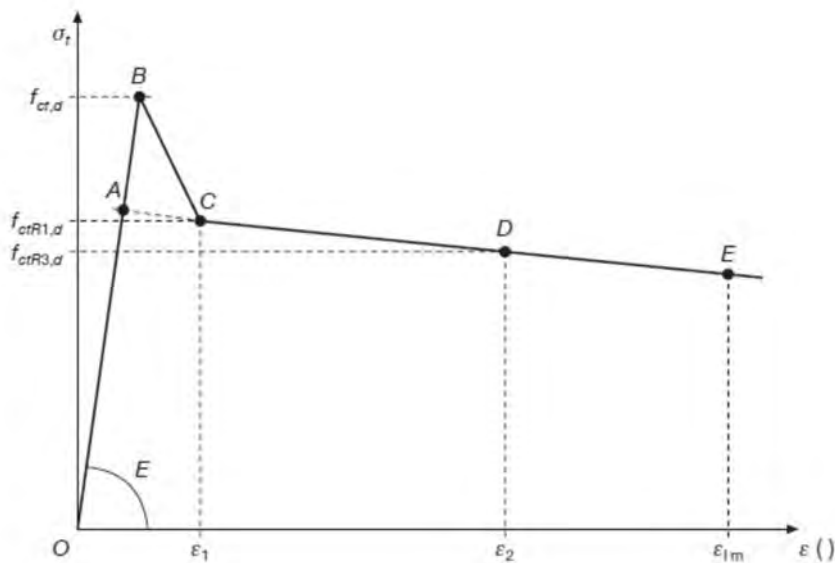


Figura 15 – Diagrama del cálculo multilíneal

donde:

$f_L$  = Carga correspondiente al límite de proporcionalidad.

$$f_{ct,d} = 0,6 f_{ct,fl,d}$$

$$f_{ctR1,d} = 0,45 f_{R,1,d}$$

$$f_{ctR3,d} = k_1 (0,5 f_{R,1,d} - 0,2 f_{R,1,d})$$

$k_1 = 1$  para secciones sometidas a flexión y  $0,7$  para secciones sometidas a tracción.

$$\varepsilon_1 = 0,1 + 1.000 f_{ct,d} / E_{c,0}$$

$$\varepsilon_2 = 2,5 / l_{cs}$$

$\varepsilon_{lim} = 20\text{‰}$  para secciones sometidas a flexión y  $10\text{‰}$  para secciones sometidas a tracción.

$l_{cs}$  = Longitud crítica (en metros) del elemento calculado que puede determinarse por la expresión:

$$l_{cs} = \min (s_m' h - x)$$

siendo:

$x$  profundidad del eje neutro.

$h - x$  distancia del eje neutro al extremo más traccionado.

$s_m$  distancia media entre fisuras. Salvo que se disponga de datos justificados se podrá utilizar para  $s_m$  los valores de la Tabla 2-3

Elementos sin armadura tradicional, o poco armados y hormigón de fibras con comportamiento a flexión con ablandamiento ( $f_{R,1} < f_L$ y $f_{R,2} < f_L$ ).	H (canto de la pieza).
Hormigón de fibras armado, con $f_{R,3,d} < 2 \text{ kN/mm}^2$ .	$s_m$ calculado de acuerdo con 49.2.4 del Anejo 14, EHE-08.
Elementos con hormigón de fibras con comportamiento a flexión con endurecimiento ( $f_{R,1} > f_L$ y/o $f_{R,2} > f_L$ ).	Se determinará de forma experimental según lo indicado en 31.3 del Anejo 14, EHE-08.
Otros casos.	Se consultará la bibliografía especializada.

Tabla 2-3

El efecto del pico A-B-C puede ser importante cuando se aplique un análisis no lineal, especialmente para pequeñas deformaciones. En otros casos, para el cálculo en rotura puede utilizarse el diagrama bilineal simplificado, formado por las rectas correspondientes al tramo elástico O-A y la prolongación de la recta C-E hasta el punto A, e incluso considerando un comportamiento rígido con  $E = \infty$ .

Se aceptarán otros diagramas de cálculo siempre que los resultados con ellos obtenidos concuerden de manera satisfactoria con los correspondientes a los del diagrama rectangular indicado en la Figura 14, o queden del lado de la seguridad.

#### Dominios de deformación

Se consideran los mismos dominios de deformación que para una estructura de hormigón convencional.

#### Efecto de confinamiento del hormigón

Las fibras con función estructural proporcional al hormigón un efecto confinamiento similar al de las armaduras transversales.

#### Flexión simple o compuesta

En aquellos casos en que se utilicen fibras con función estructural, solas o en combinación con armadura tradicional, se deberá cumplir la siguiente limitación:



$$A_p f_{pd} \frac{d_p}{d_s} + A_s f_{yd} + \frac{z_f}{z} A_{ct} f_{ctR,d} > \frac{W_1}{z} f_{ctm} + \frac{P}{z} \left( \frac{W_1}{A} + e \right)$$

donde:

donde:

$z_f A_{ct} f_{ctR,d}$  Contribución de las fibras.

$z_f$  Brazo mecánico de la tracción del hormigón.

$A_{ct}$  Área traccionada de hormigón.

$f_{ctR,d}$  Resistencia residual a tracción de cálculo en el diagrama rectangular.

En el caso de secciones rectangulares con o sin armadura pasiva puede emplearse la siguiente relación simplificada, en la que no se precisa determinar el área traccionada de hormigón.

$$A_s f_{yd} + 0,4 A_{ct} f_{ctR,d} > 0,04 A_{ct} f_{cd}$$

Esta limitación se justifica como garantía para evitar la rotura frágil del hormigón. La acción de las armaduras tradicionales y de las fibras es complementaria en este aspecto, y por tanto la limitación constituye una exigencia de contenido mínimo en fibras para elementos sin armaduras tradicionales, y la posibilidad de reducir, e incluso eliminar, la exigencia de armaduras tradicionales mínimas en elementos con contenido suficiente de fibras estructurales. Esta limitación no rige para losas apoyadas en el terreno.

#### Tracción simple o compuesta

En el caso de secciones de hormigón sometidas a tracción simple o compuesta, provistas de dos armaduras principales y fibras, deberá cumplirse la siguiente limitación:

$$A_p f_{pd} + A_s f_{yd} + A_{ct} f_{ctR,d} > 0,20 A_{ct} f_{cd}$$

#### *Estado Límite de Agotamiento frente a cortante*

La contribución de las fibras se deberá tener en cuenta en la capacidad resistente de los tirantes.

#### Piezas de hormigón reforzado con fibras sin y con armadura de cortante

Cuando existan barras longitudinales dobladas que sean tenidas en cuenta en el cálculo como armadura de cortante, al menos un tercio de la resistencia a cortante deberá ser provista por la contribución de las fibras de acero o en su caso por la contribución conjunta de las fibras de acero y estribos verticales. En todo caso, la cuantía mínima de la armadura a cortante está establecida y se dispondrá tal como lo marca el punto 44.2.3.4.1 de la EHE-08

El esfuerzo cortante de agotamiento por tracción en el alma vale:

$$V_{u2} = V_{cu} + V_{su} + V_{fu}$$

donde:

$V_{cu}$  Contribución del hormigón a la resistencia a esfuerzo cortante.

$V_{su}$  Contribución de la armadura transversal de alma a la resistencia a esfuerzo cortante.

$V_{fu}$  Contribución de las fibras de acero a la resistencia a esfuerzo cortante.

$$V_{fu} = 0,7 \xi \tau_{fd} b_0 d$$

Donde:

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$$

Con d en mm y  $\xi \leq 2$ .

$\tau_{fd}$  Valor de cálculo del incremento de la resistencia a cortante debido a las fibras, tomando el valor:

$$\tau_{fd} = 0,5 f_{ctR,d} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

En el caso de secciones en T, se podría tener en cuenta la contribución de las alas a través de un coeficiente  $k_f$  multiplicador en la expresión de  $V_{fu}$ . Este coeficiente puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$k_f = 1 + n \left( \frac{b_f}{b_0} \right) \left( \frac{h_f}{d} \right) \text{ con } k_f < 1,5$$

donde:

$h_f$  Altura de las alas en mm.

$b_f$  Ancho de las alas en mm.

$b_0$  Ancho del alma en mm.

$$n = \frac{b_f - b_w}{h_f} < 3 \text{ y } n < \frac{3b_w}{h_f}$$

#### Armaduras transversales

La cuantía mínima de refuerzo a cortante, ya sea en forma de Hormigón Reforzado por Fibras de acero y/o estribos verticales se verifica siempre que se cumpla la relación:

$$V_{su} + V_{fu} > \frac{f_{ct,m}}{7,5} b_0 d$$

#### Armaduras longitudinales

En el caso de estructuras de hormigón reforzado con fibras con función estructural, en lugar de  $V_{su}$  deberá considerarse ( $V_{su} + V_{fu}$ ) en las expresiones de la norma EHE-08.

#### Rasante entre alas y alma de una viga

Experimentalmente se ha comprobado que las fibras con función estructural pueden contribuir de forma significativa a resistir el esfuerzo rasante ala-alma. La consideración de esta contribución deberá basarse en campañas experimentales concluyentes o en publicaciones científicas avaladas.

### Estado Límite de Agotamiento frente a punzonamiento

En el caso de losas de hormigón reforzado con fibras las fibras pueden mejorar la resistencia a punzonamiento. Una primera aproximación es considerar su contribución a partir de una tensión resistente en la superficie crítica equivalente a:

$$\tau_{fd} = 0,5f_{ctR,d} \quad (\text{N/mm}^2)$$

no obstante este valor puede ser significativamente mayor, debiéndose demostrar experimentalmente si se quiere utilizar.

### Estado Límite de Agotamiento por esfuerzo rasante en juntas entre hormigones

Sólo se considerará que las fibras contribuyen a la resistencia al deslizamiento cuando se trate de juntas encastilladas transversalmente donde las dimensiones de las llaves sean comparables a la de la propia fibra.

#### 1.2.2. Model Code 2010

Para el cálculo de los hormigones con fibras también es recomendable seguir las indicaciones del Model Code 2010 (fib, 2010), publicado por la Federación Internacional del Hormigón estructural (The International Federation for Structural Concrete).

##### Clasificación

Para clasificar la resistencia post fisuración del hormigón con fibras se puede asumir un comportamiento elástico lineal, considerando los valores de resistencia residual a flexión característicos que son significativos para estado de servicio ( $f_{R1k}$ ) i último ( $f_{R3k}$ ). En particular, dos parámetros,  $f_{R1k}$  que representa el intervalo de resistencia y una letra a,b,c,d o e que representa la relación  $f_{R1k}/f_{R3k}$ .

El intervalo de resistencia se define por dos números subsiguientes en la serie:

1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0 ... [MPa]

Mientras que las letras a,b,c,d,e corresponden con los ratios de resistencia residual:

a si  $0.5 \leq f_{R1k}/f_{R3k} < 0.7$

b si  $0.7 \leq f_{R1k}/f_{R3k} < 0.9$

c si  $0.9 \leq f_{R1k}/f_{R3k} < 1.1$

d si  $1.1 \leq f_{R1k}/f_{R3k} < 1.3$

e si  $1.3 \leq f_{R1k}/f_{R3k}$

El diseñador tiene que especificar la clase de resistencia residual y el ratio  $f_{R1k}/f_{R3k}$ , así como el material de las fibras.

### Coeficientes parciales de seguridad

Los valores de diseño para la resistencia post fisuración en ELU son:

$$f_{Ftsd} = f_{Tsk} / \gamma_F$$

y

$$f_{Ftud} = f_{Tuk} / \gamma_F$$

Los valores recomendados para los coeficientes parciales de seguridad son:

Material	Coeficiente parcial de seguridad
HRF en compresión	Como en HA
HRF en tracción (límite de la linealidad)	Como en HA
HRF en tracción (resistencia residual)	$\gamma_F = 1.5$

Para los estados límite en servicio (ELS), los coeficientes parciales de seguridad deben tomarse como 1.0

### Leyes constitutivas

Las leyes constitutivas del hormigón con fibras son las mismas en el Model Code 2010 que las del Anejo 14 de la EHE-08.

### *Criterios de diseño ELS*

Para cumplir con el requisito de ductilidad todas las estructuras de hormigón con fibras sin la armadura convencional mínima deben cumplir:

$$\delta_u \geq 20 \delta_{SLS}$$

$$\delta_{peak} \geq 5 \delta_{SLS}$$

Donde  $\delta_u$  es la deformación última,  $\delta_{pico}$  la deformación con la carga máxima y  $\delta_{ELS}$  es la deformación con la carga máxima en servicio calculada realizando un análisis elástico lineal tomando las hipótesis de que el hormigón no ha fisurado y que el módulo de Young es el inicial.

En general  $\delta_u$  se relaciona con el requisito de deformación máxima de la estructura.

La carga última  $P_u$  siempre debe ser mayor que la carga de inicio de la fisuración  $P_{cr}$  y mayor que la carga máxima en servicio  $P_{ELS}$ .

### *Cortante*

#### Vigas sin armadura longitudinal ni a cortante

Cuando se utiliza hormigón con fibras sin armadura longitudinal ni transversal, la tensión principal de tracción,  $\sigma_1$ , no debe ser mayor que la resistencia a la tracción de diseño:

$$\sigma_1 \leq \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_F}$$

Donde:

$f_{Ftuk}$  es el valor característico de la resistencia última a tracción del hormigón con fibras.  
[MPa]

$\gamma_F$  Coeficiente parcial de seguridad

#### Vigas sin armadura a cortante

La resistencia de diseño a cortante en elementos con armadura longitudinal convencional y sin armadura a cortante viene dada por:

$$V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[ 100 \cdot \rho_1 \cdot \left( 1 + 7.5 \cdot \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{\frac{1}{3}} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d$$

Donde:

$\gamma_c$  es el coeficiente de seguridad parcial para el hormigón sin fibras

$k$  es el factor que tiene en cuenta el efecto de tamaño y es igual a:

$$1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0$$

$d$  es la profundidad efectiva de la sección [mm]

$\rho_1$  es el ratio de armadura longitudinal, definido como:

$$\rho_1 = A_{s1} / b_w d$$

$A_{s1}$  es el área de la sección transversal de la armadura que se extiende  $\geq l_{bd} + d$  más allá de la sección considerada

$f_{Ftuk}$  es el valor característico de la resistencia última a tracción del hormigón con fibras, considerando  $w_u = 1.5$  mm

$f_{ctk}$  Es el valor característico de la resistencia a tracción del hormigón sin fibras

$f_{ck}$  Es el valor característico de la resistencia a la compresión cilíndrica

$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c < 0.2 f_{cd}$  [MPa] es la tensión media que actúa en la sección de hormigón  $A_c$  [mm<sup>2</sup>] para un axil  $N_{Ed}$  [N], durante la carga o la acción de pretensado ( $N_{Ed} > 0$  para compresión)

$b_w$  es el ancho menor de la sección en el área en tracción [mm]

La resistencia a cortante mínima,  $V_{Rd,F}$  se supone que no es menor que el valor mínimo, definido como:

$$V_{Rd,Fmin} = (v_{min} + 0.15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

Donde:

$$v_{min} = 0.035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$$

El refuerzo mínimo a cortante debe ser proporcionado por cercos o por fibras.

#### Vigas con armadura longitudinal y a cortante

Para el diseño de elementos con armadura de cortante se aplica la relación siguiente:

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s}$$

Para elementos de hormigón con fibras la ecuación es:

$$V_{Rd} = V_{Rd,F} + V_{Rd,s}$$

#### Armadura de cortante mínima

No se requiere cumplir con la armadura mínima de cortante mediante cercos si se cumple:

$$f_{Ftuk} \geq 0.08 \sqrt{f_{ck}}$$

Donde:

$f_{Ftuk}$  es el valor característico de la resistencia última a tracción para el hormigón con fibras, considerando  $w_u=1.5$  mm [MPa].

Esto permite limitar el desarrollo y la difusión de las fisuras y, como consecuencia, asegurar la ductilidad suficiente.

#### Verificación en servicio (ELS)

##### Limitación de las tensiones

En elementos estructurales de hormigón con fibras en los que después de fisurar se produce un reblandecimiento (softening) no es necesario verificar la tensión en servicio si el elemento fue verificado en ELU.

En elementos estructurales de hormigón con fibras en los que después de fisurar se produce un endurecimiento (hardening) es necesario verificar la tensión en servicio imponiendo la limitación:

$$\sigma_t \leq 0.6 \cdot f_{Ftsk}$$

Donde  $\sigma_t$  es la tensión de tracción principal y  $f_{Ftsk}$  es el valor característico.

#### Ancho de fisura en elementos con armadura convencional

El ancho de fisura de diseño  $w_d$  en elemento de hormigón con fibras se puede calcular como:

$$w_d = 2 \left\{ k \cdot c + \frac{1}{4} \frac{\phi_s}{\rho_{s,ef}} \cdot \frac{(f_{ctm} - f_{Ftsm})}{\tau_{bm}} \right\} \cdot \frac{1}{E_s} \cdot (\sigma_s - \beta \cdot \sigma_{sr} + \eta_r \cdot \varepsilon_{sh} \cdot E_s)$$

#### Armadura mínima para el control de la fisuración

Para controlar el ancho de fisura en los elementos bajo flexión, si es necesario, se colocara una armadura que debe ser como mínimo:

$$A_{s,min} = k_c \cdot k \cdot (f_{ctm} - f_{Ftsm}) \frac{A_{ct}}{\sigma_s}$$

Donde:

- $f_{ctm}$  es el valor medio de la resistencia a tracción de la matriz de hormigón
- $f_{Ftsm}$  es el valor medio de la resistencia residual del hormigón con fibras
- $A_{ct}$  es la parte de tracción de la sección transversal de hormigón, evaluada considerando el campo de esfuerzos en el límite elástico.
- $\sigma_s$  es el esfuerzo de tracción máximo en estado fisurado, que puede ser considerado igual que el límite elástico del acero.
- $k_c$  coeficiente que tiene en cuenta la distribución de tensiones en la sección transversal justo antes de la fisuración y el cambio del brazo de palanca. Para secciones rectangulares  $k_c=1$ .

Cuando  $A_s$  es negativa, la armadura mínima solo puede ser con fibras.

### 1.2.3. Durabilidad

Uno de los temas importantes de durabilidad en las obras marítimas es la corrosión de las armaduras. En este aspecto las fibras tienen diversas ventajas respecto a la armadura convencional (Blunt, 2015):

- Se pueden utilizar fibras plásticas que no se corroen

- Si se utilizan fibras metálicas al no estar conectadas entre ellas la posible corrosión de fibras superficiales no progresa hacia el interior del elemento
- Al ser de pequeño diámetro la corrosión no provoca tanto incremento de volumen por lo que dañan menos el hormigón

El trabajo de Balouch et al. (2010) demuestra que hormigones compactos, con relaciones a/c alrededor de 0.5, y en los cuales se ha producido un correcto vibrado del hormigón se obtiene un recubrimiento de fibras mínimo de 0.2 mm y no presentan corrosión superficial de las fibras metálicas incluso en ambientes salinos.



### 3. Estudio de un cajón ejemplo

El cajón de estudio escogido es el cajón tipo 3 de la prolongación del dique este del puerto de Castellón. Esta obra ya ha sido realizada, tal y como se puede observar en la Figura 16.

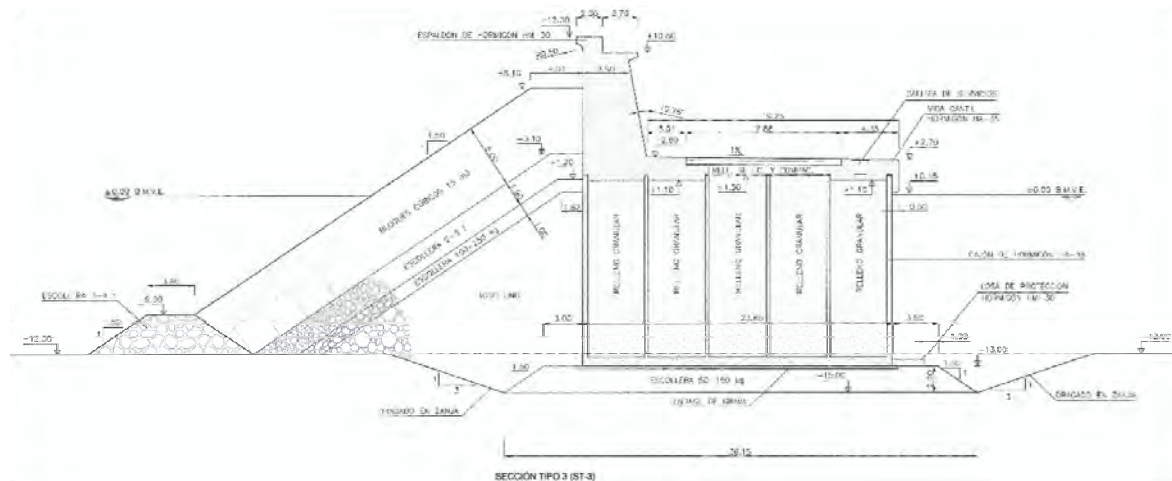


Figura 16 – Vista actual obtenida mediante Google maps

El cajón original es un dique de celdas rectangulares, pero se estudiará la viabilidad de su construcción mediante hormigón con fibras para celdas rectangulares y circulares, usando en ambos casos la misma geometría.

### 3.1. Geometría y modelo de cálculo del cajón con celdas rectangulares

En la Figura 17 se muestra una sección transversal del dique acabado, con cajón, espaldón y protección mediante escollera.



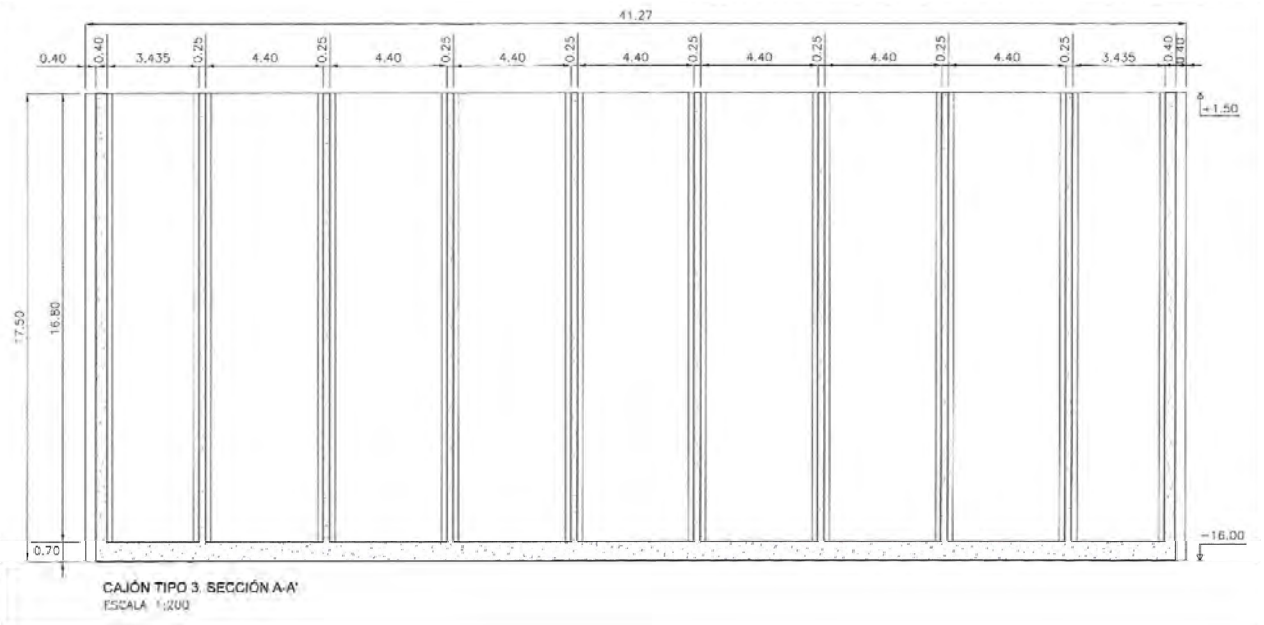


Figura 19 – Sección A-A' del cajón

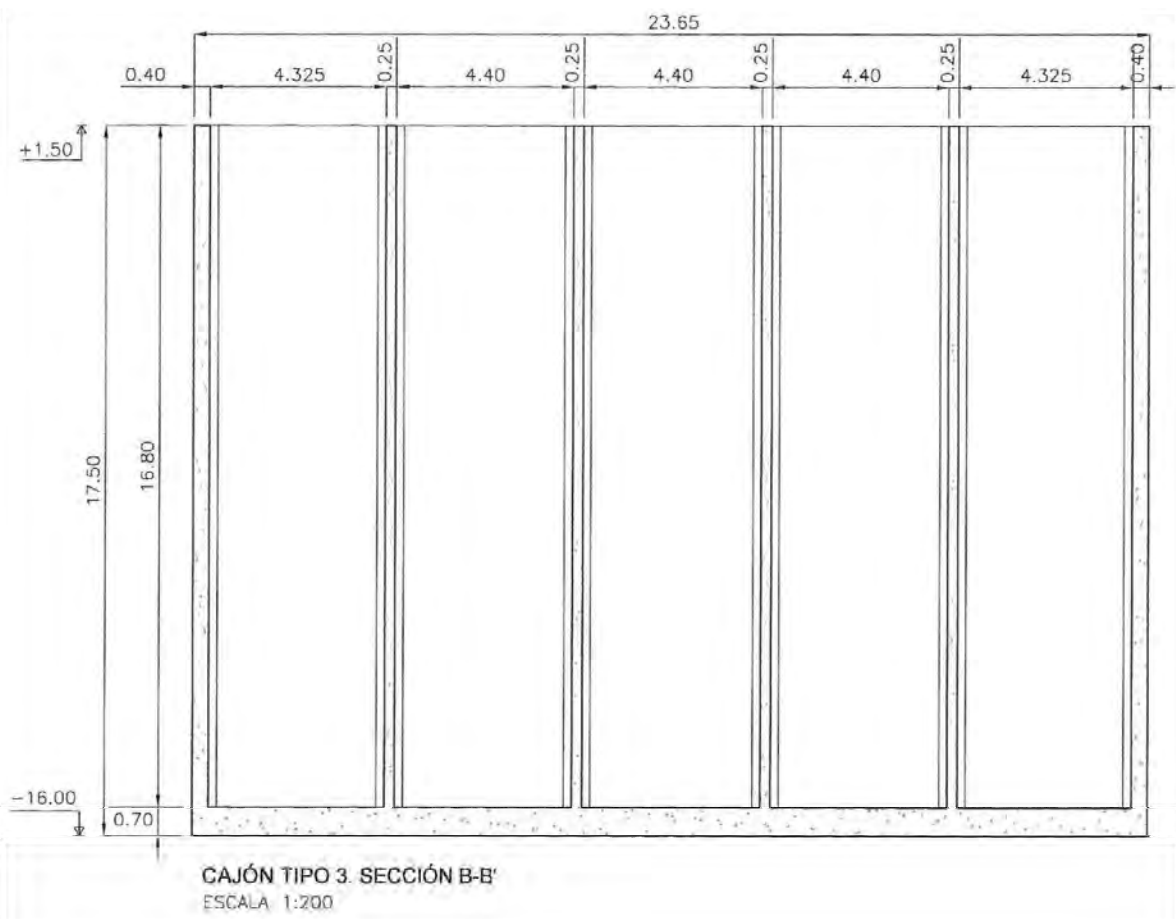
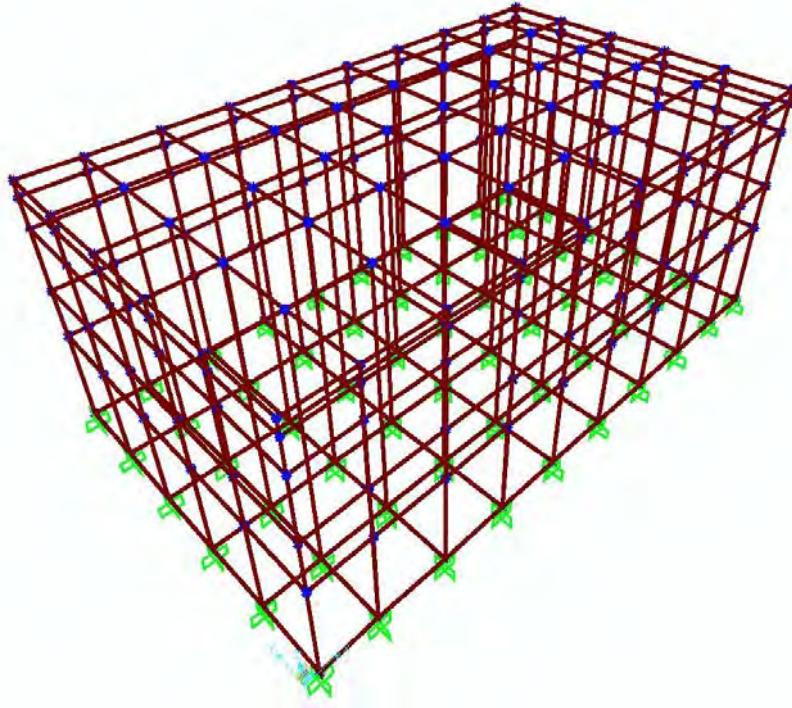
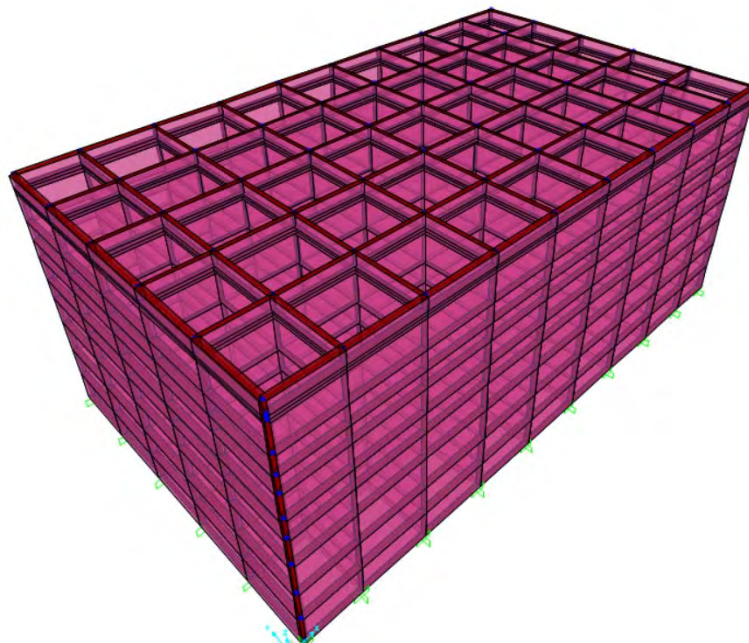


Figura 20 – Sección B-B' del cajón

Mediante el programa de cálculo estructural SAP2000 se ha realizado un modelo 3D del cajón (Figura 21) y se han introducido las características de los materiales (HA-35) y los espesores de las celdas que forman el cajón. Se crean dos modelos para poder modelizar las diferentes etapas que pasa el cajón, que son botadura y flotación, fondeo y en servicio. La diferencia geométrica entre ellas es que durante la botadura, flotación y fondeo aún no se ha construido la losa superior encima de las celdas, ni el espaldón. Es por esto que se crean dos modelos, el primero es la geometría del cajón sin la losa superior y el segundo es con la losa superior.



*Figura 21 – Modelo del cajón con celdas rectangulares*



*Figura 22 – Vista 3D del cajón con celdas rectangulares sin losa superior*



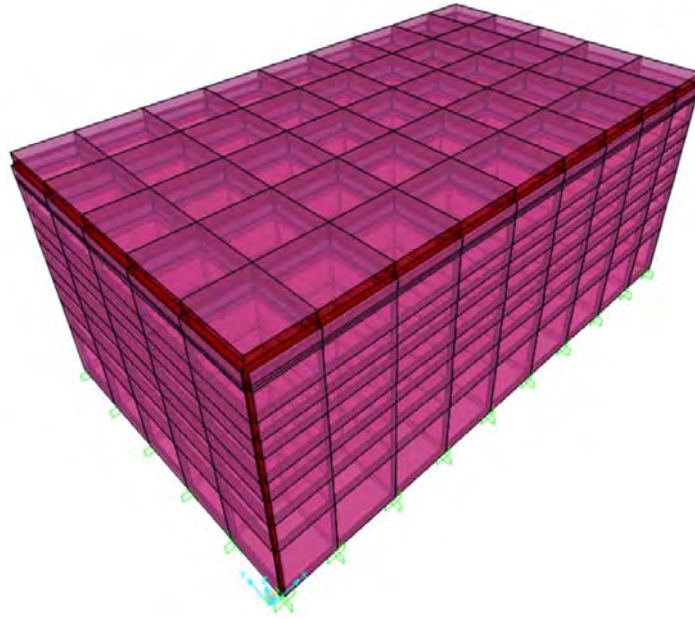


Figura 23- Vista 3D del cajón con celdas rectangulares con losa superior

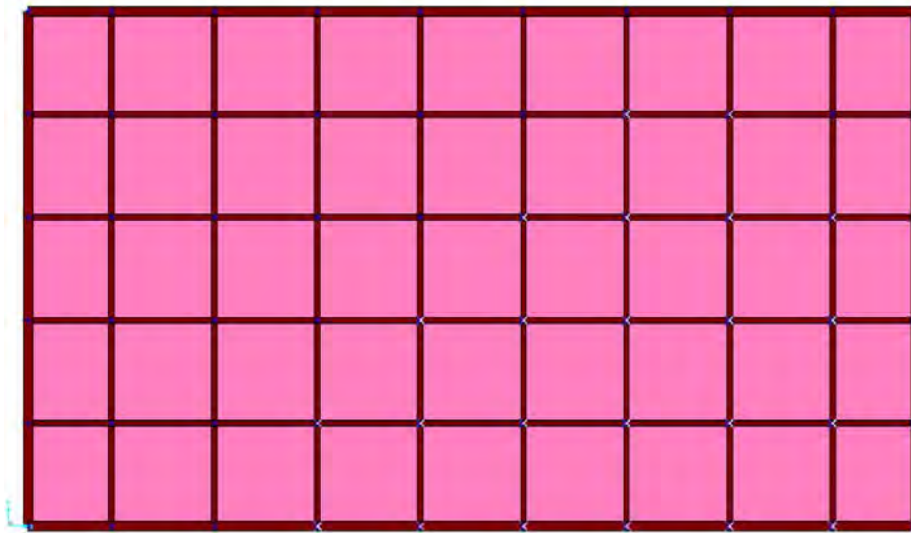


Figura 24 – Vista en planta del cajón con celdas rectangulares con los espesores

### 3.2. Geometría y modelo de cálculo del cajón con celdas circulares

Para el estudio del cajón con celdas circulares se ha adoptado la misma geometría que en el caso anterior con la diferencia que las celdas rectangulares se han sustituido con celdas circulares. Con esta opción se consigue un cajón con celdas circulares en el que se deben cambiar los encofrados, pero el paraguas y el resto del cajonero no sufren ninguna modificación.

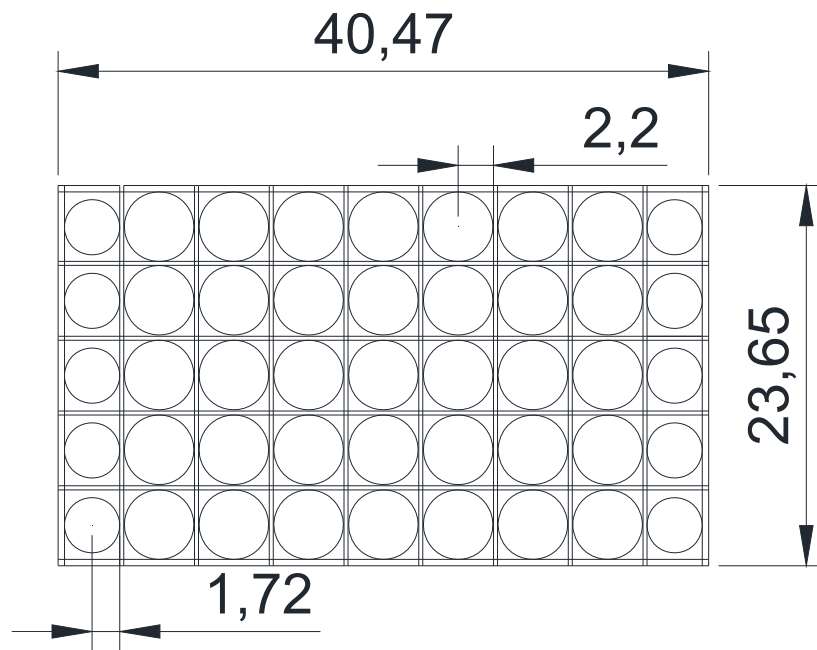


Figura 25 – Planta del cajón con celdas circulares

Esta geometría se introduce en el programa SAP 2000:

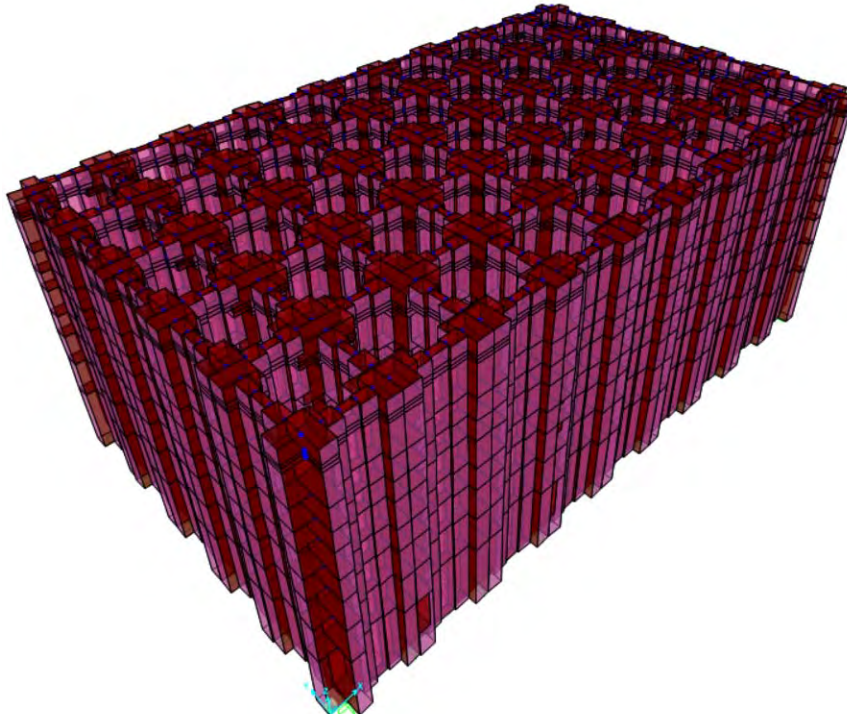


Figura 26 – Vista 3D del cajón con celdas circulares con los espesores

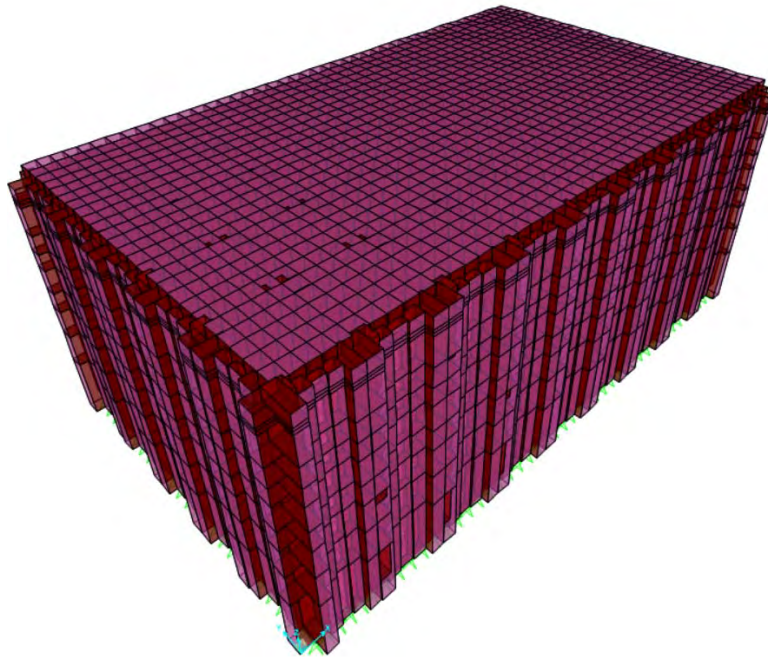


Figura 27 - Vista 3D del cajón con celdas circulares con losa superior

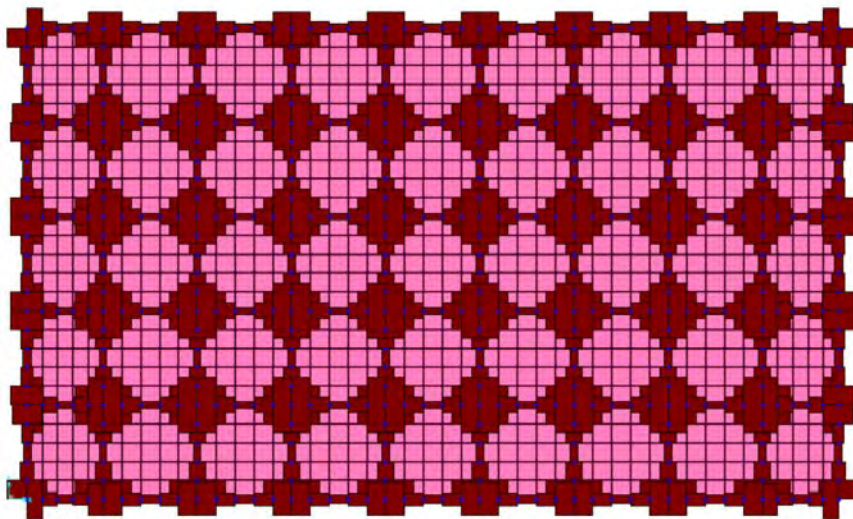


Figura 28 – Vista en planta del cajón con celdas circulares con los espesores

Los elementos utilizados en ambos modelos son elementos tipo placa. No se han utilizado elementos sólidos 3D por el número de elementos resultantes y las dificultades inherentes en dichos modelos para obtener esfuerzos, necesarios para las verificaciones en ELU y ELS.

Al modelizar el cajón con celdas circulares de esta manera se está del lado de la seguridad ya que no se tiene en cuenta el efecto arco, pues los axiles debidos a cargas perpendiculares al plano son nulos.

### 3.3. Geometría y modelo de cálculo del cajón con celdas circulares optimizadas

En este caso se estudia un cajón con celdas originales pero con una geometría interna diferente a la original, situando las celdas al tresbolillo, que conllevaría una modificación del paraguas del cajonero. A cambio se disminuye la cantidad de hormigón que se necesita.

La geometría exterior es la misma, igual que los espesores mínimos de 0.40 metros para las paredes exteriores y de 0.25 metros para las interiores.

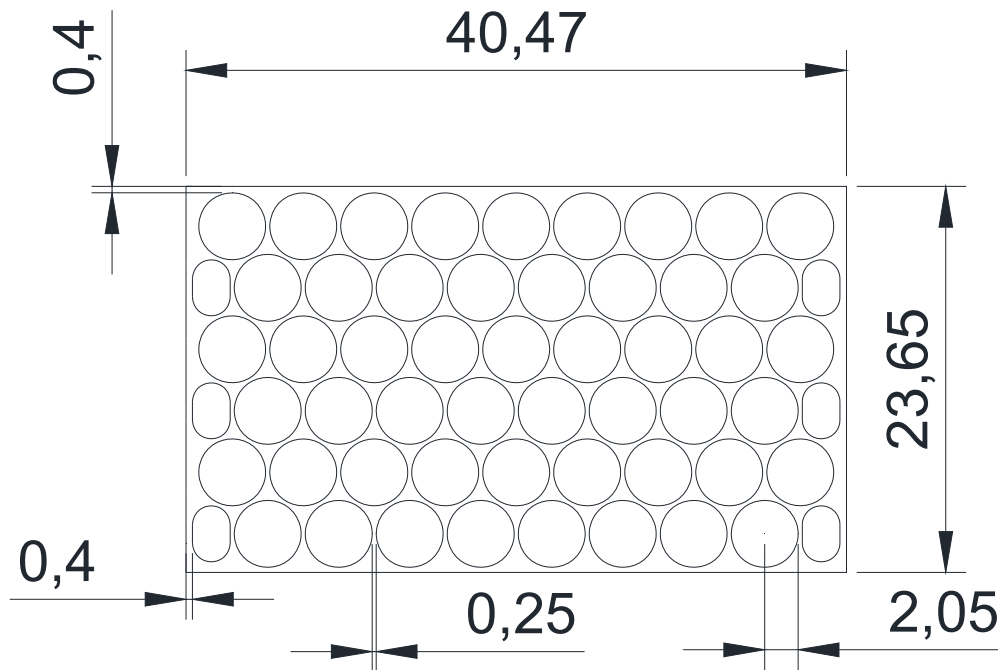


Figura 29 – Geometría cajón con celdas circulares optimizadas

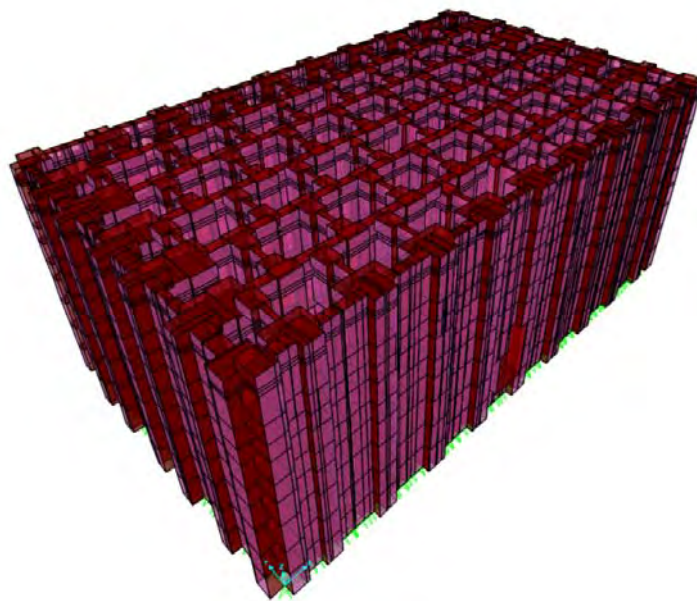


Figura 30 – Vista 3D del cajón con celdas circulares optimizadas con los espesores



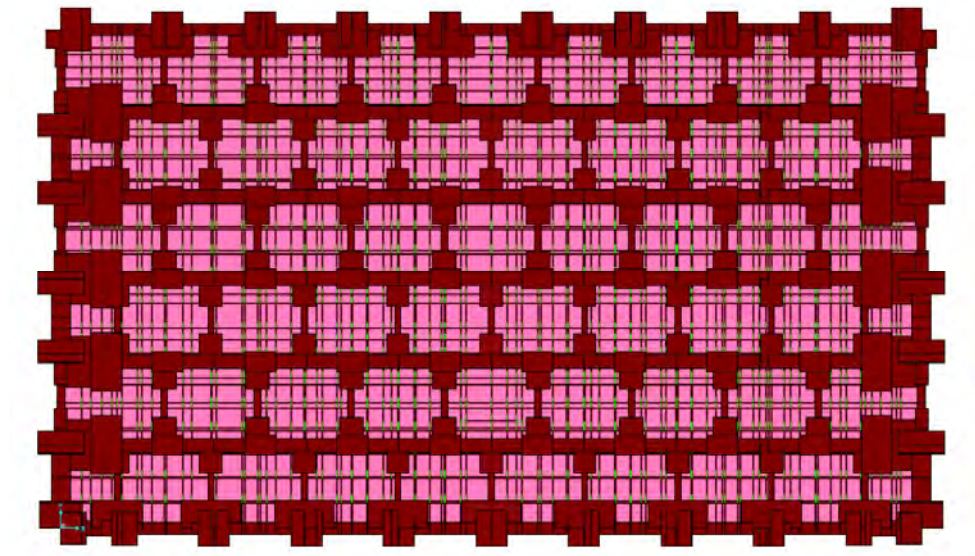


Figura 31 – Vista en planta del cajón con celdas circulares optimizadas con los espesores

### 3.4. Cargas

#### Acciones permanentes

- Peso propio: Se considera el peso específico del hormigón seco. Por tanto, su valor es de  $25 \text{ kN/m}^3$  y el programa de cálculo SAP2000 ya lo tiene en cuenta al introducir las secciones.
- Empuje de Arquímedes: Durante la botadura y la flotación el calado es de 6,62m, y en fondeo el calado es de 16,20m por lo que:

$$E_{\text{arquim, flotación}} = \frac{10.1 \text{ kN}}{\text{m}^3} * 6.62 \text{ m} = 66.86 \text{ kN/m}^2$$
$$E_{\text{arquim, fondeo}} = \frac{10.1 \text{ kN}}{\text{m}^3} * 16.20 = 163.62 \text{ kN/m}^2$$

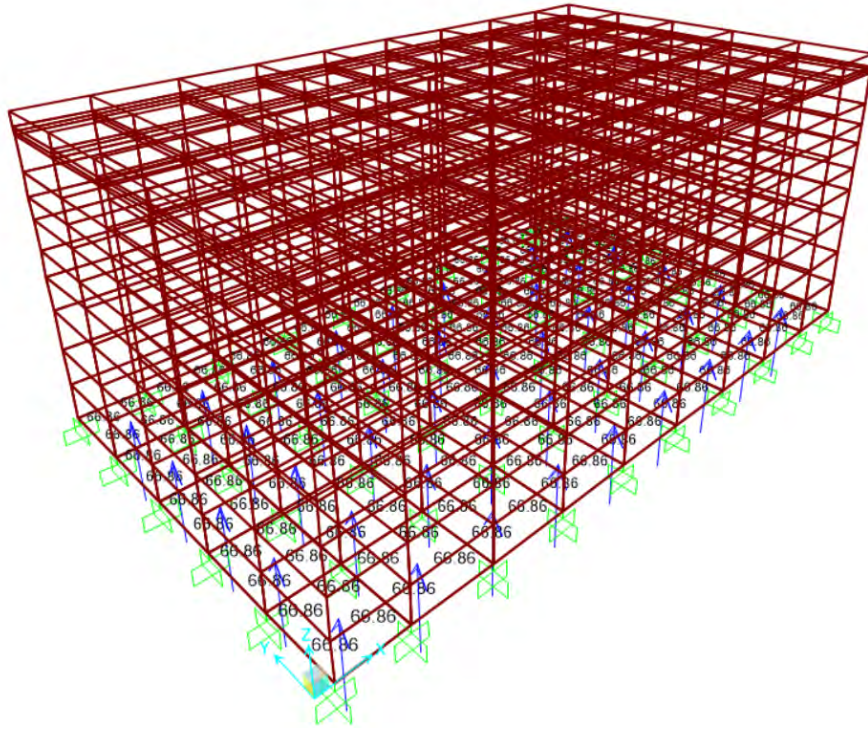


Figura 32 – Modelización del empuje de Arquímedes

- Cargas muertas: Son cargas muertas el peso de la superestructura y los posibles rellenos de tierra sobre el cajón.

En este caso las cargas muertas son el espaldón de hormigón, un pequeño relleno y la viga cantil de hormigón.

- Espaldón:  $43.63\text{m}^2 \times 25\text{kN/m}^3 = 1091\text{ kN/m}$
- Viga cantil:  $0.76\text{m}^2 \times 25\text{kN/m}^3 = 19\text{ kN/m}$
- Losa:  $1.6\text{ m} \times 25\text{kN/m}^3 = 40\text{ kN/m}^2$

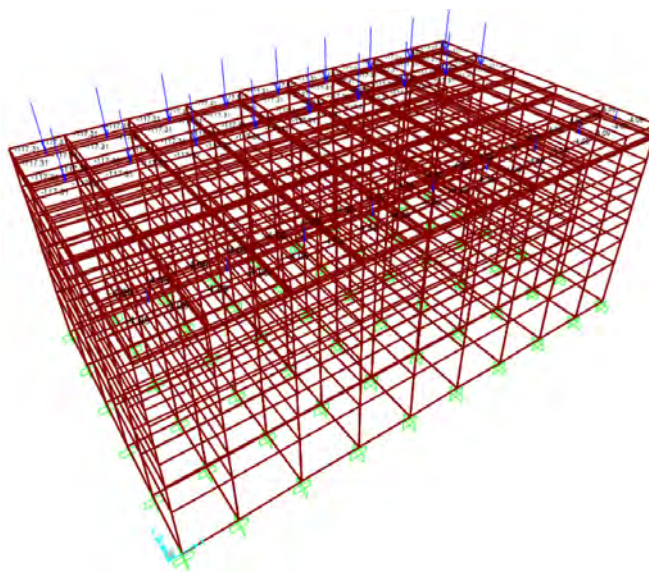


Figura 33 – Modelización de las cargas muertas

- Empuje hidrostático: Como se ha indicado anteriormente se tomará como peso específico del agua  $10,1 \text{ KN/m}^3$ .
  - Durante la botadura y la flotación el calado es de 6.62m por lo que la ley de presiones es:

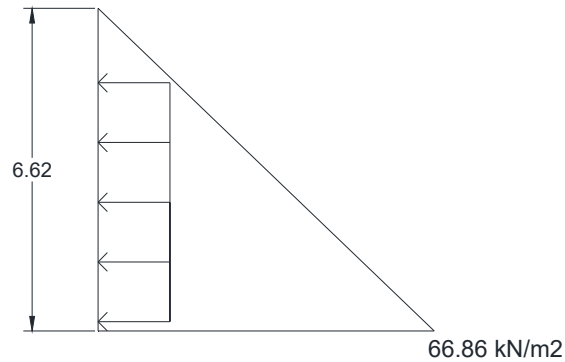


Figura 34 – Empuje hidrostático en flotación

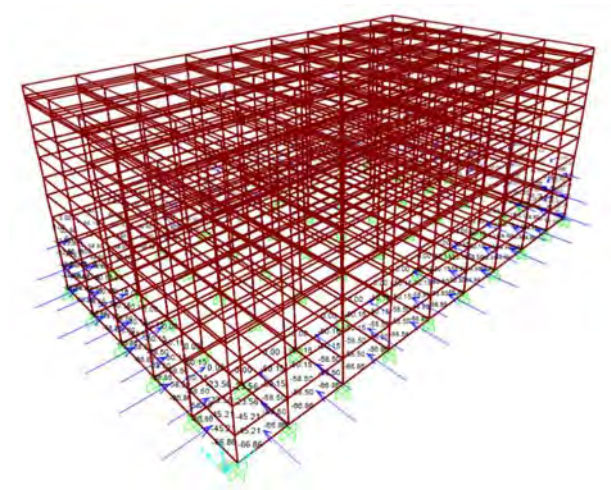


Figura 35 – Modelización del empuje hidrostático en flotación

- En fondeo el calado es de 16.20 m, por lo que la ley de presiones es:

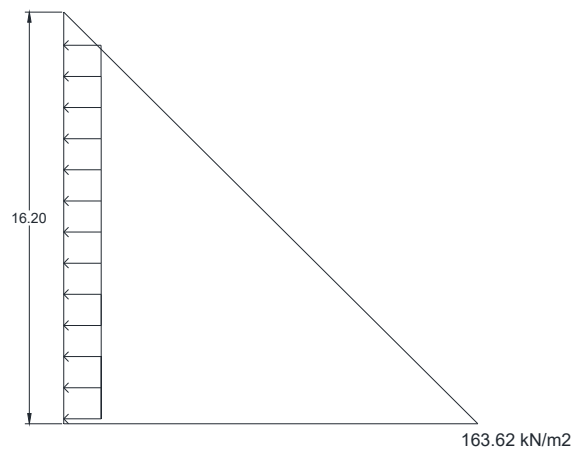


Figura 36 – Empuje hidrostático en fondeo



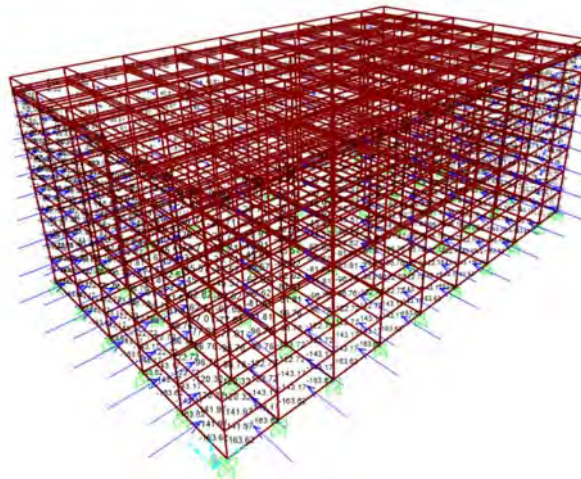


Figura 37 – Modelización del empuje hidrostático en fondeo

- Durante la botadura y flotación no es necesario, por estabilidad, lastrar el cajón con agua salada, en cambio en fondeo se deben lastar todas las celdas con 10.00 m de agua salada. La ley de presiones para este caso es:

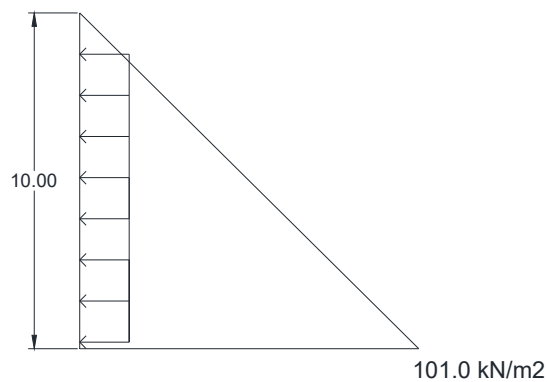


Figura 38 – Empuje hidrostático por lastre en las celdas durante el fondeo

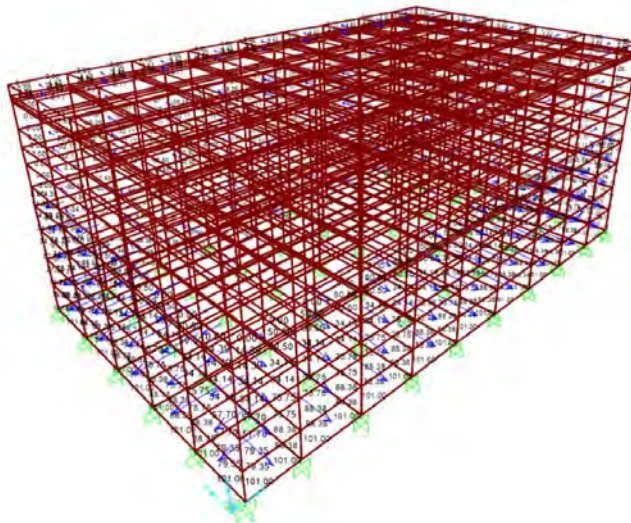


Figura 39 – Modelización del empuje hidrostático por lastre en las celdas durante el fondeo

- Peso de las tierras: Como no se trata de un muelle no se debe considerar.
- Acciones verticales debidas a las tierras del material ensilado: Las dimensiones de las celdas hacen que se asimilen a un silo y que, en consecuencia, presenten el denominado efecto silo. Este efecto consiste en que todo el peso del material de relleno no se transmite al fondo del cajón, sino que una parte apreciable del mismo se transmite por rozamiento a las paredes de hormigón. De esta forma, las paredes presentan un axil de compresión que es favorable a su resistencia y que no debe ser despreciado.

Como hay 3 tipos de celdas diferentes se calcula para cada una de ellas. Los tipos de celda que hay son las celdas centrales, las de esquina y las laterales.

Las características del relleno son:

- Densidad seca:  $\gamma_d = 17.2 \text{ t/m}^3$
- Densidad saturada:  $\gamma_{sat} = 21.0 \text{ t/m}^3$
- Densidad sumergida:  $\gamma_{sum} = 10.8 \text{ t/m}^3$
- Ángulo de rozamiento interno:  $\Phi = 30.00^\circ$
- Ángulo de rozamiento árido-pared:  $\delta = 0.60 \cdot 30 = 18.00^\circ$
- Coeficiente de empuje:  $\lambda = 0.50$

Denominando  $P_r$  a la presión vertical sobre el fondo del cajón y  $P'_r$  presión vertical de rozamiento debida al empuje de tierras o tensión tangencial en las paredes interiores, se tiene que:

$$P_r = \gamma' Z_0 (1 - e^{-z/z_0}) + q e^{-z/z_0}$$

$$P'_r = \lambda \gamma' Z_0 (1 - e^{-z/z_0}) \operatorname{tg} \delta + \lambda q e^{-z/z_0} \operatorname{tg} \delta$$

$$Z_0 = \frac{A}{u \lambda \cdot \operatorname{tg} \delta}$$

donde

- $z$  Profundidad desde la cara superior del terreno hasta el punto en que se evalúa el empuje. En este caso los cálculos se van a realizar para distintas profundidades. Se calcula a 5.50 m, a 11.00 m y a 16.80 metros.
- $\lambda$  coeficiente de empuje horizontal. Para rellenos granulares se adopta un valor de 0,5 que corresponde al empuje al reposo para un suelo de ángulo de rozamiento interno de  $30^\circ$
- $\gamma'$  peso específico sumergido del material de relleno, normalmente  $10 \text{ KN/m}^3$
- $\delta$  ángulo de rozamiento terreno-estructura.

A área de una celda o cántara.

u perímetro de una celda o cántara

q sobrecarga o peso de terreno por encima de las celdas. En este caso no se considera ya que las sobrecargas se apoyan en las paredes de las celdas y no en el material ensilado.

Las características de cada tipo de celda son:

Tipo de celda	Central	Esquina	Lateral
<b>Longitud</b>	4.40 m	3.44 m	4.33 m
<b>Anchura</b>	4.40 m	4.40 m	4.40 m
<b>Área</b>	19.28 m <sup>2</sup>	14.934 m <sup>2</sup>	18.91 m <sup>2</sup>
<b>Perímetro</b>	17.13 m	15.01 m	16.91 m
<b>Z<sub>0</sub></b>	6.93 m	6.12 m	6.88 m

A partir de las características de las celdas se calcula la presión vertical sobre el fondo del cajón ( $P_r$ ) y la presión vertical de rozamiento debida al empuje de tierras o tensión tangencial ( $P'r$ ).

Celda Central		
Profundidad	$P_r$	$P'r$
5.50 m	41.0 kN/m <sup>2</sup>	6.7 kN/m <sup>2</sup>
11.00 m	59.5 kN/m <sup>2</sup>	9.7 kN/m <sup>2</sup>
16.80 m	68.2 kN/m <sup>2</sup>	11.1 kN/m <sup>2</sup>

Celda de Esquina		
Profundidad	$P_r$	$P'r$
5.50 m	39.2 kN/m <sup>2</sup>	6.4 kN/m <sup>2</sup>
11.00 m	55.2 kN/m <sup>2</sup>	9.0 kN/m <sup>2</sup>
16.80 m	61.9 kN/m <sup>2</sup>	10.1 kN/m <sup>2</sup>

Celda Lateral		
Profundidad	$P_r$	$P'r$
5.50 m	40.9 kN/m <sup>2</sup>	6.6 kN/m <sup>2</sup>
11.00 m	59.3 kN/m <sup>2</sup>	9.6 kN/m <sup>2</sup>
16.80 m	67.9 kN/m <sup>2</sup>	11.0 kN/m <sup>2</sup>

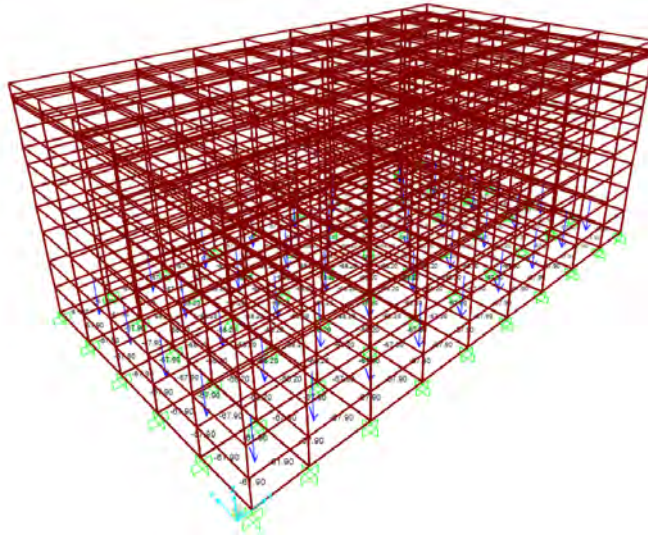


Figura 40 – Modelización de la presión vertical sobre el fondo del cajón.

#### Acciones permanentes de valor no constante

- Acciones horizontales del relleno de las celdas: Al igual que en las acciones verticales es preciso tener en cuenta el efecto silo. Así la presión horizontal tiene por expresión la siguiente:

$$e_r = \lambda \gamma' Z_0 (1 - e^{-z/z_0}) + \lambda q e^{-z/z_0}$$

$$Z_0 = \frac{A}{u \lambda \cdot \tan \delta}$$

Donde las variables son las mismas utilizadas en el apartado anterior, con lo que los resultados son:

Celda Central	
Profundidad	$e_\alpha$
5.50 m	20.5 kN/m <sup>2</sup>
11.00 m	29.8 kN/m <sup>2</sup>
16.80 m	34.1 kN/m <sup>2</sup>

Celda de Esquina	
Profundidad	$e_\alpha$
5.50 m	19.6 kN/m <sup>2</sup>
11.00 m	27.6 kN/m <sup>2</sup>
16.80 m	30.9 kN/m <sup>2</sup>

Celda Lateral	
Profundidad	$e_\alpha$
5.50 m	20.5 kN/m <sup>2</sup>
11.00 m	29.7 kN/m <sup>2</sup>
16.80 m	33.9 kN/m <sup>2</sup>

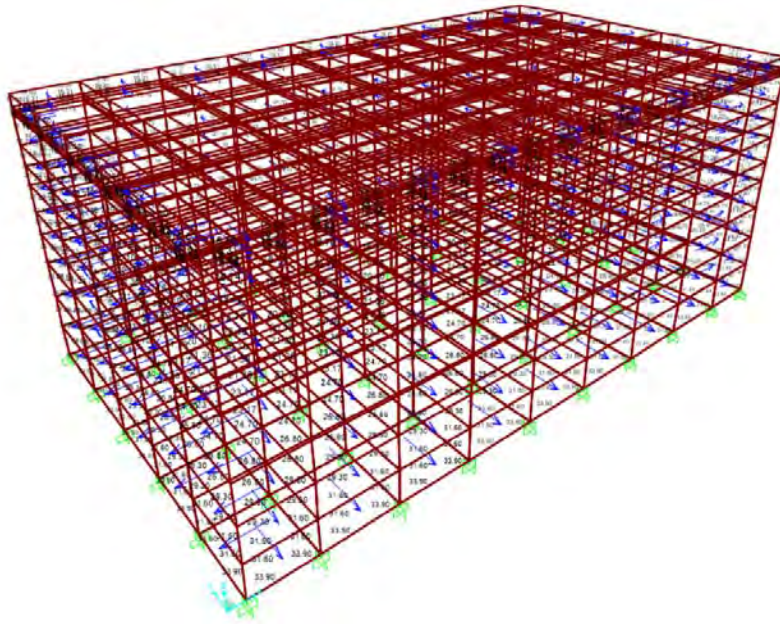


Figura 41 – Modelización presión horizontal relleno de tierras

- Empuje de tierras en trasdós de muro: Como el cajón no es un muelle portuario no se produce el empuje.

#### Acciones variables

- Sobrecargas de uso y explotación: Son las acciones a las que será sometido el cajón durante la explotación de la obra, tales como manipulación de mercancías, tráfico vial y/o ferroviario, sobrecargas de uso, acciones de amarre de buques,...

Como el cajón estudiado solo es un dique de protección no se consideran las sobrecargas debidas al atraque de buques, ni las sobrecargas por almacenamiento o movimiento de mercancías debido a que esta no será su función. Las sobrecargas que se tienen en cuenta son una sobrecarga de  $5 \text{ kN/m}^2$  que es lo que corresponde para áreas de uso general.



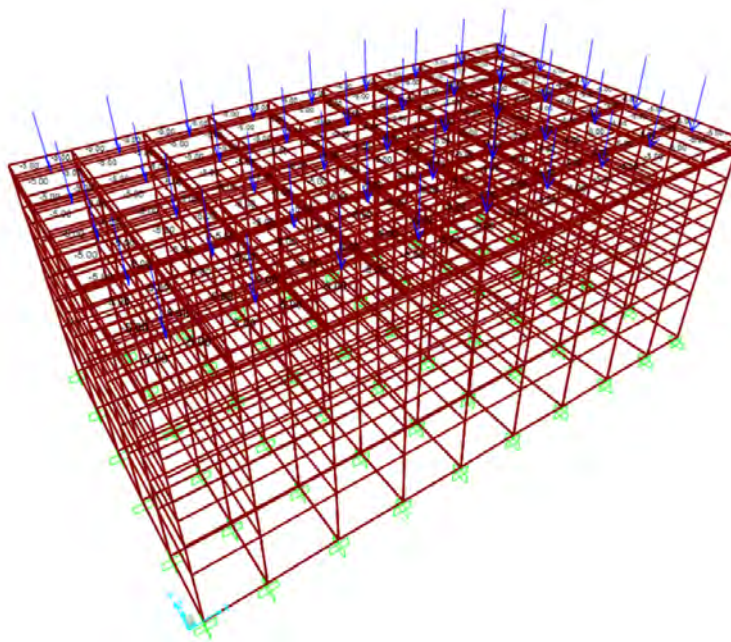


Figura 42 – Modelización de la sobrecarga de uso

### Acciones climáticas

- Oleaje: La acción del oleaje viene definida en la ROM. Se distinguen dos hipótesis de carga:

- a) Acción del oleaje al paso de la cresta de la ola en fase de servicio

El cálculo de las presiones sobre el dique debido al paso de la cresta de la ola y sus resultantes se calculan de acuerdo del método de Goda, según la formulación de Yoshimi Goda (2010).

Este método se desarrolló con el objetivo de conseguir una fórmula válida tanto en la zona de ondas estacionarias, así como en la de rotura. Posteriormente se comprobó que para este último caso el método minimizaba los esfuerzos, por lo que se ha completado con las modificaciones propuestas por Takahashi (2015).

Los resultados obtenidos deben entenderse como de servicio.

Se realiza el cálculo para la bajamar mínima viva equinoccial (BMVE) y para la pleamar máxima viva equinoccial (PMVE).

#### Características del oleaje

Las características del oleaje se obtienen de la nota de cálculo *Acción del oleaje. Prolongación del Dique Este del Puerto de Castellón*.

Periodo significativo ( $T_{1/3}$ ):	13 s
Altura de ola significativa ( $H_{1/3}$ ):	3 m
Ángulo de incidencia del oleaje ( $\beta$ ):	0°

Densidad del agua del mar ( $W_0$ ):	1.025 t/m <sup>3</sup>
<u>Características de la sección tipo</u>	
Profundidad del terreno (h):	11.00 m
Carrera de marea:	0.40 m
Profundidad de la solera (h'):	16.00 m
Francobordo de la sección (h <sub>c</sub> ):	12.00 m
Profundidad de la banqueta (d):	11.00 m
Anchura de la berma (b <sub>m</sub> ):	6.50 m
Anchura de la solera del dique:	23.65 m
Coeficiente reductor por retranqueo del espaldón:	1.00
Pendiente del terreno ( $\alpha$ ):	0.00 %

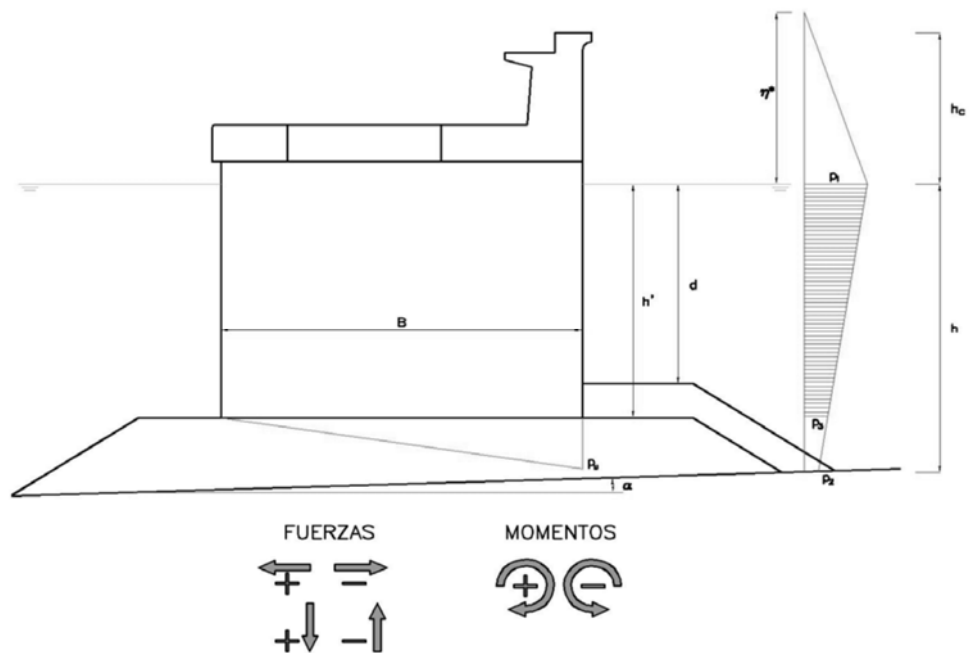


Figura 43 – Esquema del cajón y sus características

### Cálculos preliminares

#### -Datos geométricos

Profundidades en B.M.V.E.	Profundidades en P.M.V.E.
h=11.00 m	h=11.40 m
h'=16.00 m	h'=16.40 m
h <sub>c</sub> = 12.00 m	h <sub>c</sub> = 11.60 m
d=11.00 m	d=11.40 m

#### -Caracterización del oleaje

	B.M.V.E.	P.M.V.E.
Longitud en profundidad0 indefinida	L <sub>0</sub> = 263.86 m	L <sub>0</sub> = 263.86 m
Longitud en profundidades reducidas	L=129.13 m	L=131.24 m
Profundidad de rotura	h <sub>b</sub> =11.00 m	h <sub>b</sub> = 11.40 m
Rotura por fondo, altura máxima	H <sub>b</sub> =8.00m	H <sub>b</sub> =8.26 m
<b>Altura de ola de cálculo</b>	<b>H<sub>d</sub>=5.40 m</b>	<b>H<sub>d</sub>= 5.40 m</b>

-Fórmulas utilizadas

$$L_0 = \frac{g \cdot T_{\frac{1}{3}}^2}{2 \cdot \pi}$$

$$L = L_0 \cdot th\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L}\right)$$

$$h_b = h + 5 \cdot H_{\frac{1}{3}} \cdot \frac{\alpha}{100}$$

$$H_b = 0'17 \cdot L_0 \cdot \left(1 - e^{\left[-1'50 \cdot \frac{\pi \cdot h_b}{L_0} \left(1 + 15 \cdot tg^{\frac{4}{3}}(\alpha)\right)\right]}\right)$$

$$H_D = \min \left\{ H_{\frac{1}{250}} = 1'80 \cdot H_{\frac{1}{3}}, H_b \right\}$$

-Coeficientes

- Coeficientes de la formulación de Goda:

B.M.V.E.
$\eta^* = 8.100$
$\alpha_1 = 0.946$
$\alpha_2 = 0.00$
$\alpha_3 = 0.814$

P.M.V.E.
$\eta^* = 8.100$
$\alpha_1 = 0.941$
$\alpha_2 = 0.000$
$\alpha_3 = 0.809$

$$\eta^* = 0'75 \cdot (1 + \cos(\beta)) \cdot H_{\max}$$

$$\alpha_1 = 0'6 + \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{4 \cdot \pi \cdot h/L}{\sinh\left(4 \cdot \pi \cdot h/L\right)} \right]^2$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3 \cdot h_b} \cdot \left( \frac{H_{\max}}{d} \right)^2, \frac{2 \cdot d}{H_{\max}} \right\}$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\cosh\left(2 \cdot \pi \cdot h/L\right)} \right]$$

- Coeficientes de la formulación de Takahashi (Goda modificado):

B.M.V.E.
----------

P.M.V.E.
----------

$\alpha_{I0} = 0.491$
$\alpha_{I1} = -0.006$
$\alpha_I = -0.003$
$\alpha_2^* = 0.000$

$\alpha_{I0} = 0.474$
$\alpha_{I1} = -0.006$
$\alpha_I = -0.003$
$\alpha_2^* = 0.000$

$$\begin{cases} \alpha_{IO} = \frac{H}{d} \Leftrightarrow H < 2 \cdot d \\ \alpha_{IO} = 2 \Leftrightarrow H > 2 \cdot d \end{cases}$$

$$\alpha_I = \alpha_{I1} \cdot \alpha_{I0}$$

$$\alpha_2^* = \max\{\alpha_2, \alpha_I\}$$

$$\begin{cases} \alpha_{I1} = \frac{\cos(\delta_2)}{\cosh(\delta_1)} \Leftrightarrow \delta_{22} \leq 0 \\ \alpha_{I1} = \frac{1}{\cosh(\delta_1) \cdot \sqrt{\cosh(\delta_2)}} \Leftrightarrow \delta_{22} > 0 \end{cases}$$

- Coeficientes de la formulación de Takahashi, Tanimoto, Shimosako:

<b>B.M.V.E.</b>
$\delta_{11} = -0.281$
$\delta_{22} = -0.533$
$\delta_1 = -5.616$
$\delta_2 = -2.611$

<b>P.M.V.E.</b>
$\delta_{11} = -0.282$
$\delta_{22} = -0.533$
$\delta_1 = -5.631$
$\delta_2 = -2.610$

$$\delta_{11} = 0'98 \cdot \left( \frac{B_m}{L} - 0'12 \right) + 0'36 \cdot \left( \frac{h-d}{h} - 0'6 \right) \quad \begin{cases} \delta_1 = 20 \cdot \delta_{11} \Leftrightarrow \delta_{11} \leq 0 \\ \delta_1 = 15 \cdot \delta_{11} \Leftrightarrow \delta_{11} > 0 \end{cases}$$

$$\delta_{22} = -0'30 \cdot \left( \frac{B_m}{L} - 0'12 \right) + 0'93 \cdot \left( \frac{h-d}{h} - 0'6 \right) \quad \begin{cases} \delta_2 = 4'9 \cdot \delta_{22} \Leftrightarrow \delta_{22} \leq 0 \\ \delta_2 = 3'0 \cdot \delta_{22} \Leftrightarrow \delta_{22} > 0 \end{cases}$$

### Presiones elementales

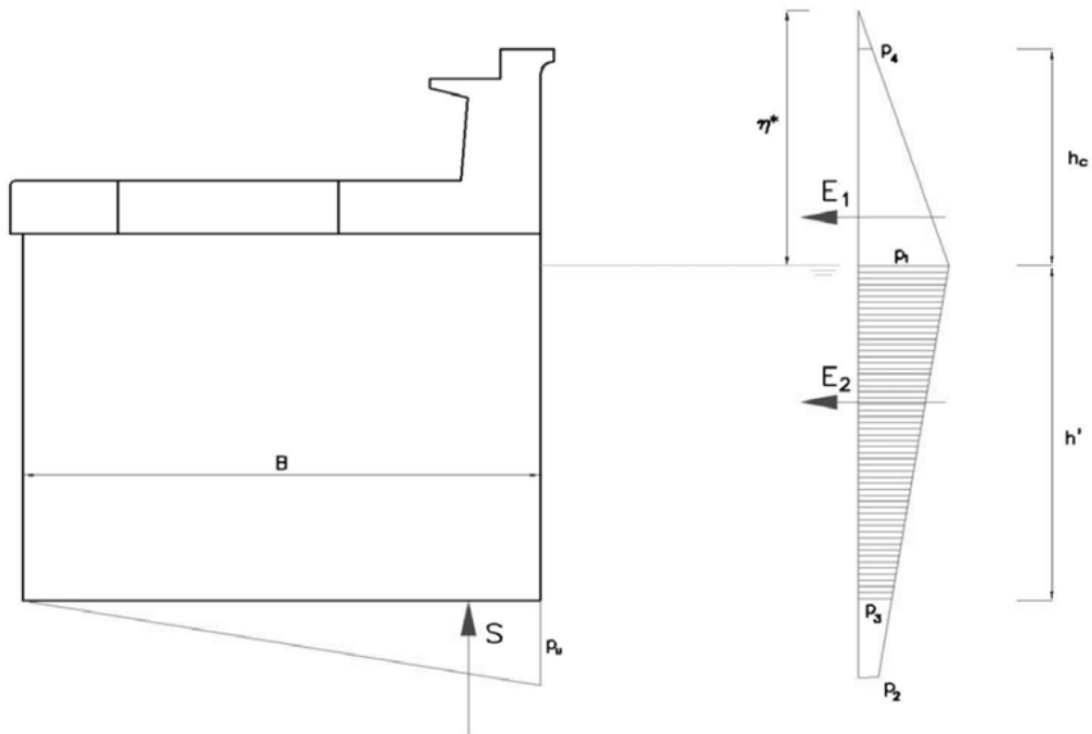


Figura 44 – Esquema de las presiones

B.M.V.E. (kN/m <sup>2</sup> )
p <sub>1</sub> = 52.4
p <sub>2</sub> = 45.7
p <sub>3</sub> = 42.6
p <sub>4</sub> = 0.00
p <sub>u</sub> = 42.6

P.M.V.E. (kN/m <sup>2</sup> )
p <sub>1</sub> = 52.1
p <sub>2</sub> = 45.2
p <sub>3</sub> = 42.2
p <sub>4</sub> = 0.00
p <sub>u</sub> = 42.2

$$p_1 = 0'50 \cdot (1 + \cos(\beta)) \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 \cdot \cos^2(\beta)) \cdot W_o \cdot H_D$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L}\right)}$$

$$p_3 = \alpha_1 \cdot p_1$$

$$\begin{cases} p_4 = \frac{p_1}{\eta^*} \cdot (\eta^* - h_c) \Leftrightarrow \eta^* > h_c \\ p_4 = 0 \Leftrightarrow \eta^* \leq h_c \end{cases}$$

$$p_u = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(\beta)) \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_3 \cdot W_o \cdot H_D$$

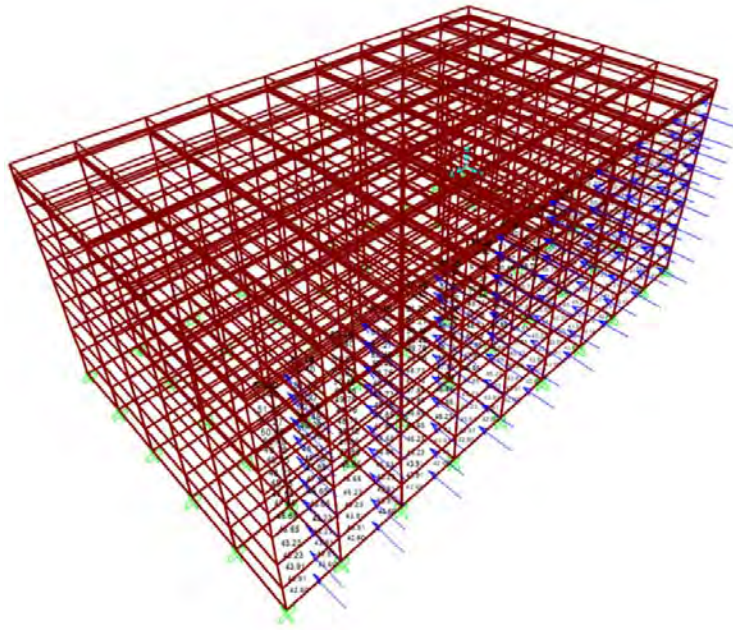


Figura 45 – Modelización oleaje al paso de la cresta de la ola en B.M.V.E.

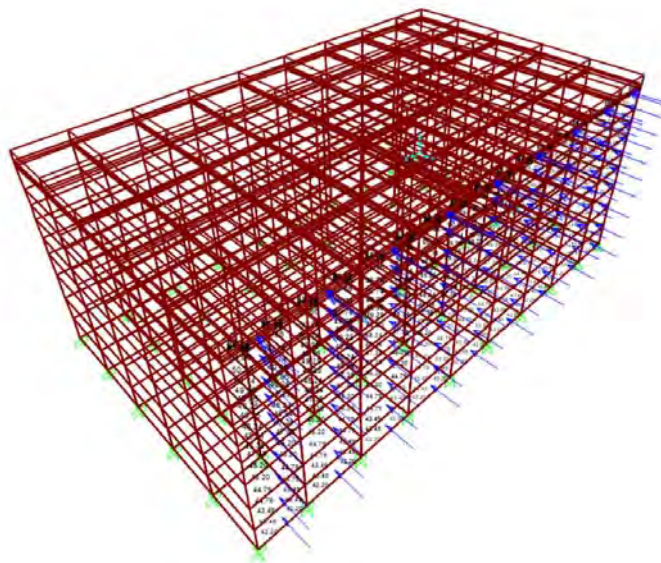


Figura 46 - Modelización oleaje al paso de la cresta de la ola en P.M.V.E.

b) Acción del oleaje al paso del seno de la ola en fase de servicio

El cálculo de las presiones negativas sobre el dique provocadas por el seno de la ola se calculan de acuerdo el método desarrollado por George Sainflou, que permite estimar las presiones debidas a las olas no rotas, basándose en la formación de una onda estacionaria frente al paramento incidente.

Los valores que se obtiene son en servicio.

### Características del oleaje

Periodo signficante ( $T_{1/3}$ ):	13 s
Altura de ola signficante ( $H_{1/3}$ ) ,:	3 m
Densidad del agua del mar ( $W_0$ ):	1.025 t/m <sup>3</sup>

### Características de la sección tipo

Profundidad del terreno (h):	11 m
Carrera de marea:	0.4 m
Profundidad de la solera (h'):	16 m
Anchura de la solera del dique:	23.65 m
Pendiente del terreno ( $\alpha$ ):	0.00%

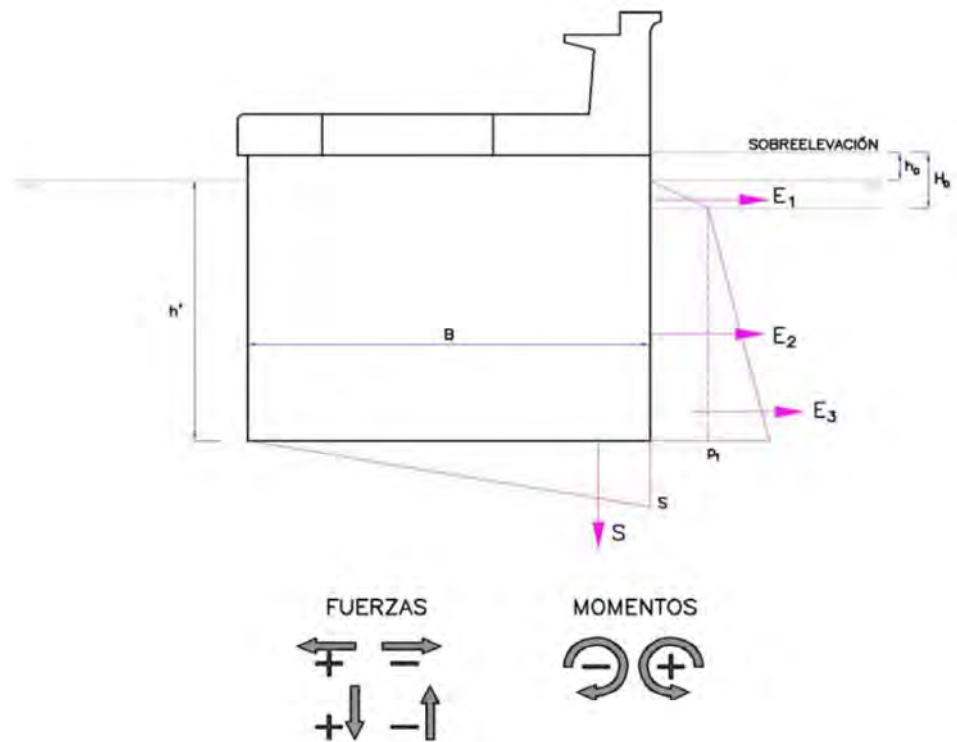


Figura 47 – Esquema de las presiones

### Cálculos preliminares

- Datos geométricos

Profundidades en B.M.V.E.	Profundidades en P.M.V.E.
$h=11.00$ m	$h=11.40$ m
$h'=16.00$ m	$h'=16.40$ m



-Caracterización del oleaje

	<b>B.M.V.E.</b>	<b>P.M.V.E.</b>
Longitud en profundidades indefinida	$L_0 = 263.86 \text{ m}$	$L_0 = 263.86 \text{ m}$
Longitud en profundidades reducidas	$L = 129.13 \text{ m}$	$L = 131.24 \text{ m}$
Profundidad de rotura	$h_b = 11.00 \text{ m}$	$h_b = 11.40 \text{ m}$
Rotura por fondo, altura máxima	$H_b = 8.00 \text{ m}$	$H_b = 8.26 \text{ m}$
<b>Altura de ola de cálculo</b>	<b><math>H_d = 5.40 \text{ m}</math></b>	<b><math>H_d = 5.40 \text{ m}</math></b>

-Fórmulas utilizadas

$$L_0 = \frac{g \cdot T_{\frac{1}{3}}^2}{2 \cdot \pi}$$

$$L = L_0 \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L}\right)$$

$$h_b = h + 5 \cdot H_{\frac{1}{3}} \cdot \frac{\alpha}{100}$$

$$H_b = 0.17 \cdot L_0 \cdot \left(1 - e^{\left[-1.50 \cdot \frac{\pi \cdot h_b}{L_0} \left(1 + 15 \cdot \tanh^{\frac{1}{3}}(\alpha)\right)\right]}\right)$$

$$H_D = \min \left\{ H_{\frac{1}{250}} = 1.80 \cdot H_{\frac{1}{3}}, H_b \right\}$$

Presiones

<b>B.M.V.E.</b>
$h_0 = 1.088 \text{ m}$
$p_1 = 41.97 \text{ (kN/m}^2\text{)}$
$H_D - h_0 = 4.312 \text{ m}$
$h' + h_0 - H_D = 11.688 \text{ m}$
$p = 44.19 \text{ (kN/m}^2\text{)}$

<b>P.M.V.E.</b>
$h_0 = 1.065 \text{ m}$
$p_1 = 41.79 \text{ (kN/m}^2\text{)}$
$H_D - h_0 = 4.335$
$h' + h_0 - H_D = 12.065 \text{ m}$
$p = 44.44 \text{ (kN/m}^2\text{)}$

$$h_0 = \frac{\pi \cdot H_D^2}{L} \cdot \coth\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h'}{L}\right) \quad p_1 = \frac{\gamma \cdot H}{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h'}{L}\right)} \quad p = \gamma \cdot (H_D - h_0)$$



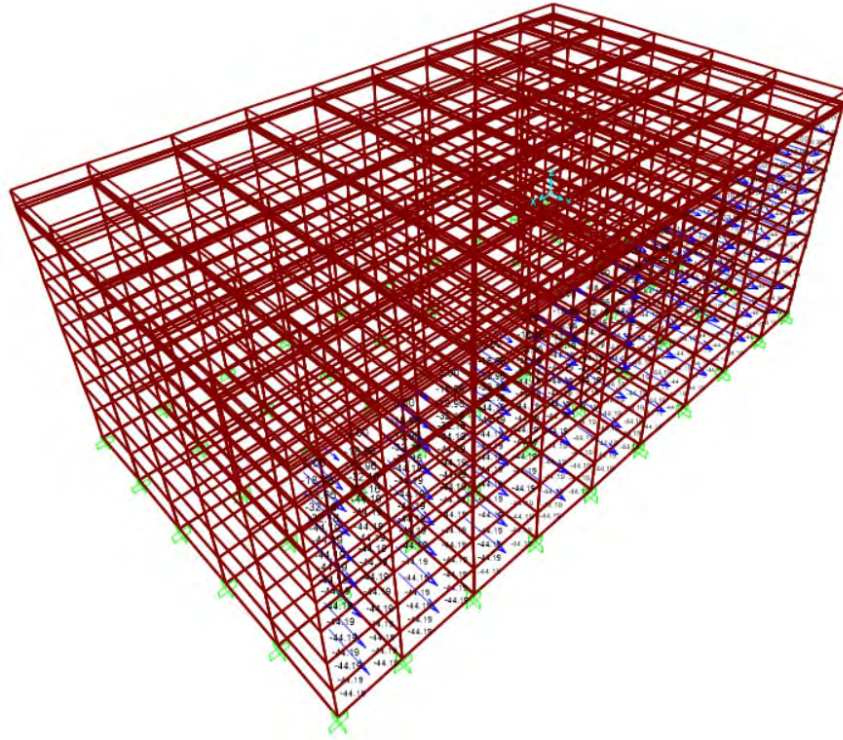


Figura 48 - Modelización oleaje al paso del seno de la ola en B.M.V.E.

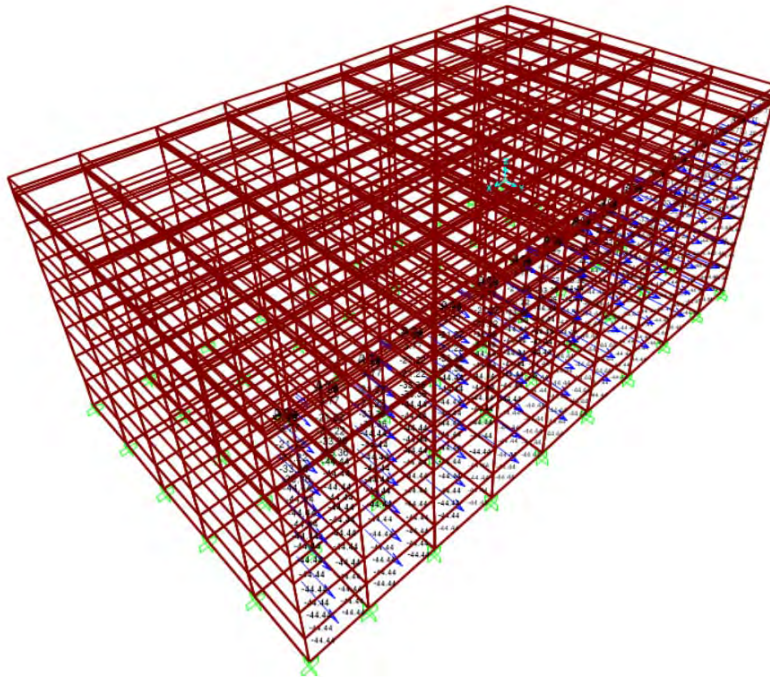


Figura 49 - Modelización oleaje al paso del seno de la ola en P.M.V.E.

- Temperatura: No es una acción importante en elementos de este tipo, con paredes delgadas.

### Acciones extraordinarias

- Sismo: Es de aplicación la norma sismorresistente. Sin embargo, dado que la acción sísmica sólo afecta a la estabilidad global del cajón, no a su estructura, no es de aplicación para el estudio que aquí se desarrolla.

### 3.5. Combinación de acciones

Una vez se han introducido las acciones en el modelo SAP 2000 se crean las combinaciones de acciones necesarias siguiendo las indicaciones del *Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias* del ministerio de fomento.

### Estado Límite Último

En la siguiente tabla se indican las combinaciones de acciones que se han de tener en cuenta según el manual:

Situación Persistente o transitoria	Comb	$P_0, P_a$	$P_1, P_{12}$	$E_a$	$P_r, P'_r$	$E_r$	$P_t$	$E_T$	$E_{co}, P_{co,1}$	$E_{so}, P_{so,1}$	$P_{sc}$
Fase de flotación ▲+	ELU1	1,00/ 1,35(*)	1,35	1,35							
Fase de Fondeo ▲	ELU2	1,00/ 1,35(*)	1,35	1,35							
Presión sobre una celda resto vacío +	ELU3					1,50					
<b>MUELLES (aguas abrigadas)</b>											
Servicio ▲◆	ELU4	1,00/ 1,35(*)	1,00/ 1,35(*)	1,35	1,00/ 1,35(*)	1,50	1,00/ 1,35(*)	1,00/ 1,50(*)			1,50
<b>DIQUES</b>											
Presión Ext. Seno Oleaje ▲◆	ELU5	1,00/ 1,35(*)	1,00/ 1,35(*)	1,35	1,00/ 1,35(*)	1,50	1,00/ 1,35(*)	1,00/ 1,50(*)		1,50	$\psi_0 \times$ 1,50(**)
Oleaje ▲◆	ELU6	1,00/ 1,35(*)	1,00/ 1,35(*)	1,00	1,00/ 1,35(*)	1,00	1,00/ 1,35(*)	1,00/ 1,50(*)	1,50		$\psi_0 \times$ 1,50(**)
<p><math>P_0</math> Peso Propio del cajón (solera y zapatas, <math>P_{oc}</math> y paredes <math>P_{op}</math>). <math>P_0 = P_{oc} + P_{op}</math>.</p> <p><math>P_a</math> Empuje ascensional del agua (empuje de Arquímedes).</p> <p><math>P_1</math> Peso del agua contenida en las celdas del cajón.</p> <p><math>P_{12}</math> Peso del agua que gravita sobre las zapatas.</p> <p><math>E_a</math> Empuje Hidrostático.</p> <p>Empuje de agua en trasdós de muelle o dique.</p> <p><math>P'_r</math> Peso del Relleno que se transmite por el fuste (Efecto Silo).</p> <p><math>P_r</math> Peso del Relleno de tierras que se transmite por la superficie de la celda (Efecto Silo).</p> <p><math>E_r</math> Acciones horizontales (Empuje) debidas al Relleno (Efecto Silo).</p> <p><math>E_T, P_t</math> Empuje de Tierras sobre trasdós de muelles o diques trasdosados, Peso de tierras sobre zapata.</p> <p><math>E_{so}</math> Seno de Oleaje (Temporal de diseño).</p> <p><math>P_{so,1}</math> Sub-Presión hidrodinámica debida al paso del seno de la ola.</p> <p><math>E_{co}</math> Cresta de Oleaje (Temporal de diseño).</p> <p><math>P_{co,1}</math> Sub-Presión hidrodinámica debida al paso de la cresta de la ola.</p> <p><math>P_{sc}</math> Sobrecarga de uso.</p>											
<p><b>Leyenda</b> ▲ Posible estado crítico para paredes exteriores.</p> <p>+ Posible estado crítico para paredes interiores.</p> <p>◆ Posible estado crítico para la cimentación.</p> <p>(*) A efectos del cálculo de la solera, resulta necesario considerar ambas posibilidades. En el caso de acciones debidas al terreno se mayorarán o minorarán simultáneamente los efectos verticales y horizontales.</p> <p>(**) Se da por supuesto que la acción del oleaje es predominante, siendo ésta la situación más habitual.</p>											

En este caso no se considera la situación en que hay presión sobre una celda y el resto vacío ya que el cajón es simétrico por lo que esta situación no se producirá, tampoco se consideran los casos para muelle al ser un dique el caso estudiado.

En los casos del paso de la cresta de la ola y el seno de la ola primero se ha creado una envolvente del paso de la ola en el caso M.M.V.E. y del caso P.M.V.E., y es con esta envolvente con la que se realiza la combinación ELU.

### Estado Límite de Servicio

En la siguiente tabla se indican las combinaciones de acciones que se han de tener en cuenta según el manual:

Situación Persistente	Comb	$P_0, P_a$	$P_l, P_{lz}$	$E_a$	$P_r, P'_r$	$E_r$	$P_t$	$E_t$	$E_{co}, P_{co,s}$	$E_{so}, P_{so,s}$	$P_{sc}$
MUELLES (aguas abrigadas)											
Servicio ▲◆+	ELS	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			$\psi_2$
DIQUES											
Presión Ext. Seno Oleaje ▲◆+	ELS	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	$\psi_2$
Presión int. Cresta Oleaje ▲◆+	ELS	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		$\psi_2$
$P_0$	Peso Propio del cajón (solera y zapatas, $P_{oc}$ , y paredes $P_{op}$ ). $P_0 = P_{oc} + P_{op}$ .										
$P_a$	Empuje ascensional del agua (empuje de Arquímedes – situación cuasipermanente).										
$P_l$	Peso del agua contenida en las celdas del cajón.										
$P_{lz}$	Peso del agua que gravita sobre las zapatas (situación cuasipermanente).										
$E_a$	Empuje Hidrostático (situación cuasipermanente).										
	Empuje de agua en trasdós de muelle o dique (situación cuasipermanente).										
$P'_r$	Peso del Relleno que se transmite por el fuste (Efecto Silo).										
$P_r$	Peso del Relleno de tierras que se transmite por la superficie de la celda (Efecto Silo).										
$E_r$	Acciones horizontales (Empuje) debidas al Relleno (Efecto Silo).										
$E_t, P_t$	Empuje de Tierras sobre trasdós de muelles o diques trasdosados, Peso de tierras sobre zapata.										
$E_{so}$	Seno de Oleaje (ola cuasipermanente).										
$P_{so,s}$	Sub-Presión hidrodinámica debida al paso del seno de la ola (ola cuasipermanente).										
$E_{co}$	Cresta de Oleaje (ola cuasipermanente).										
$P_{co,s}$	Sub-Presión hidrodinámica debida al paso de la cresta de la ola (ola cuasipermanente).										
$P_{sc}$	Sobrecarga de uso (valor cuasi permanente).										
Legenda	▲ Posible estado crítico para paredes exteriores. + Posible estado crítico para paredes interiores. ◆ Posible estado crítico para la cimentación.										

En este caso se considera solo las situaciones correspondientes a diques:

### 3.6. Resultados modelo celdas rectangulares

Una vez creados los modelos, introducidas las cargas y las combinaciones se procede a correr los modelos y a obtener los resultados para el cajón de celdas rectangulares

#### 3.6.1. Criterio de signos

El criterio de signos utilizado es el mismo que el SAP 2000, en el que las tracciones tienen signo positivo y las compresiones negativo.



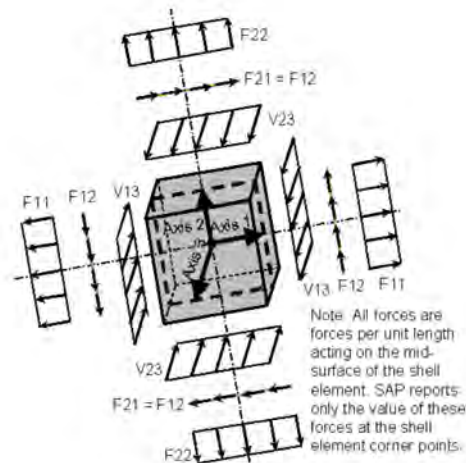


Figura 50 – Criterio de signos SAP 2000

### 3.6.2. ELU

A continuación se muestran los resultados obtenidos en Estado Límite Último tanto para las paredes interiores como exteriores para la combinación ELU cresta de la ola, los resultados de las demás combinaciones se encuentran en el anejo. Los resultados ya se encuentran mayorados.

#### *Paredes exteriores*

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje horizontal:

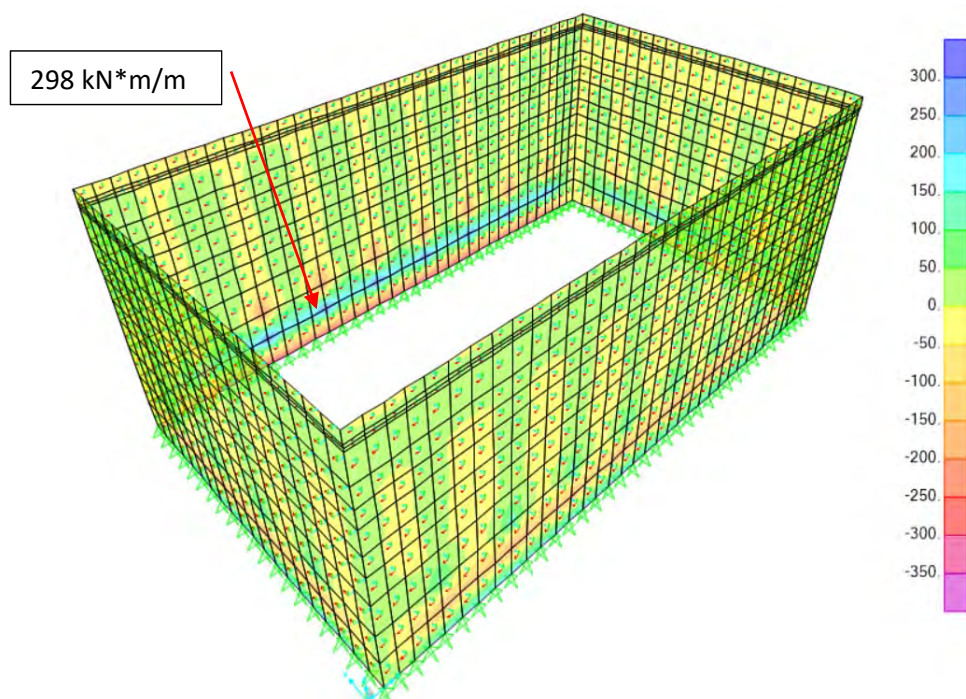


Figura 51 – M22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje vertical:

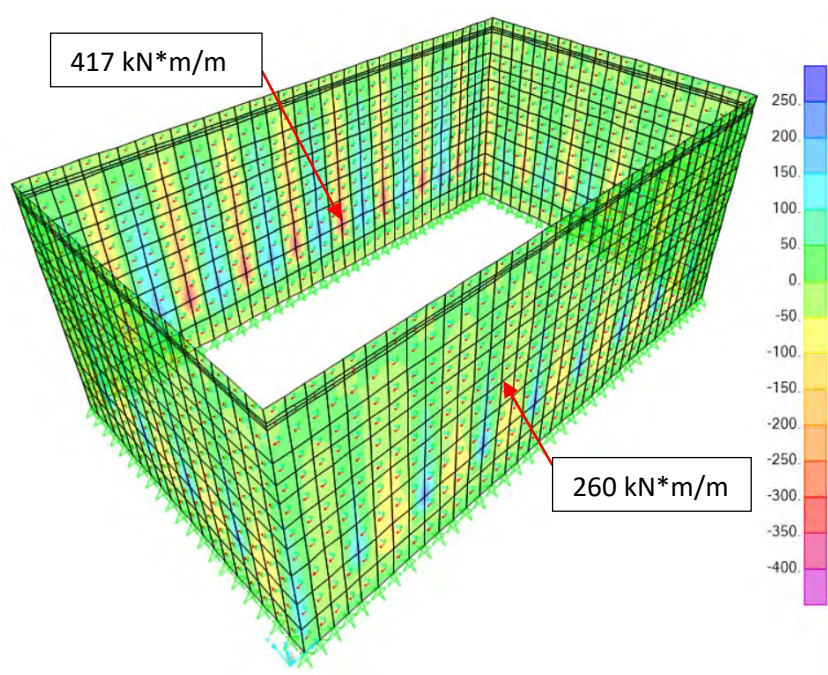


Figura 52 – M11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento torsor M12:

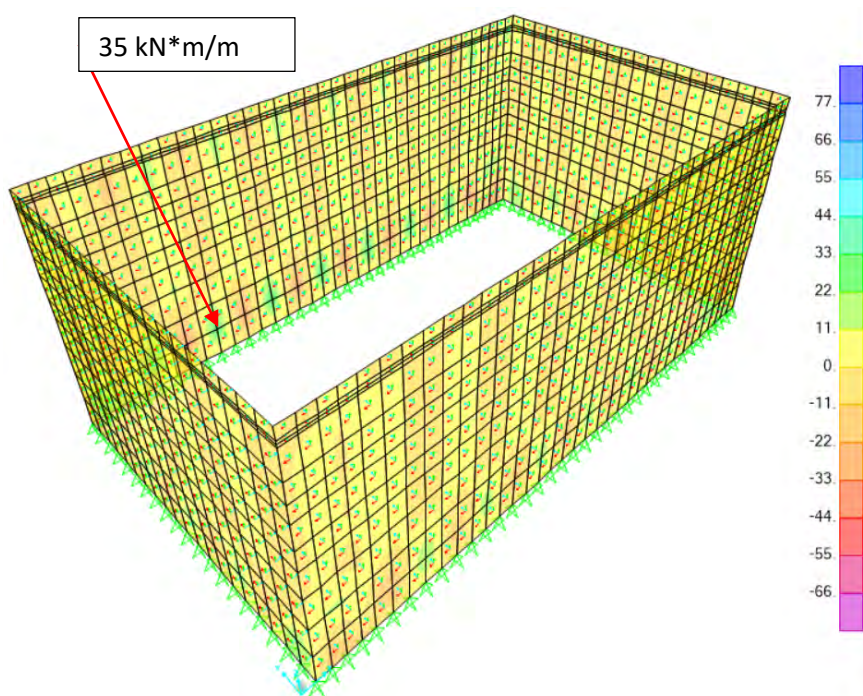


Figura 53 – M12 ELU Cresta de la ola



Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje horizontal:

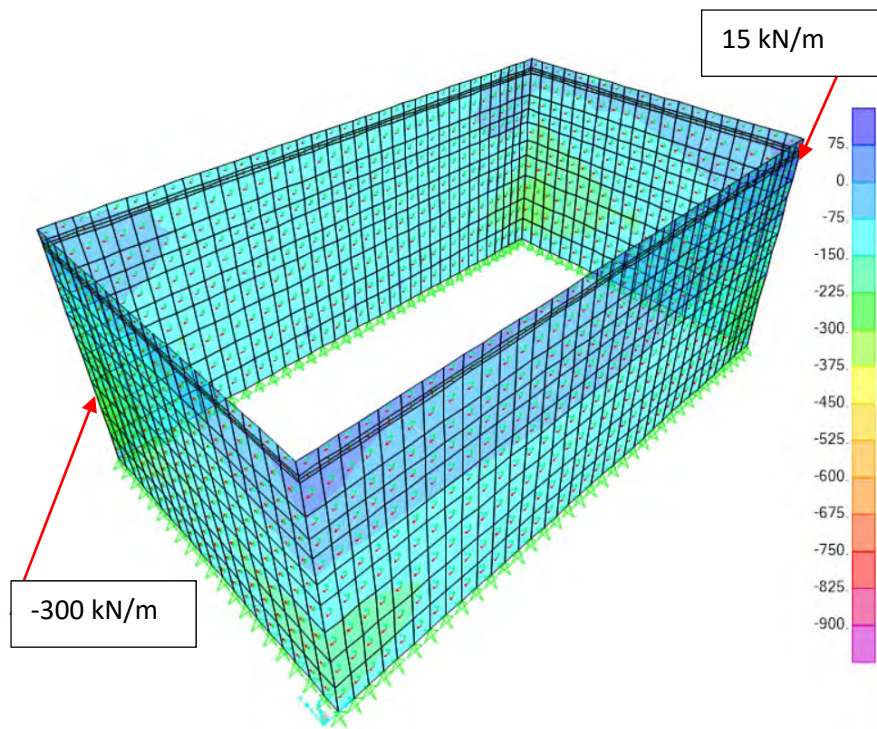


Figura 54 – F11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje vertical:

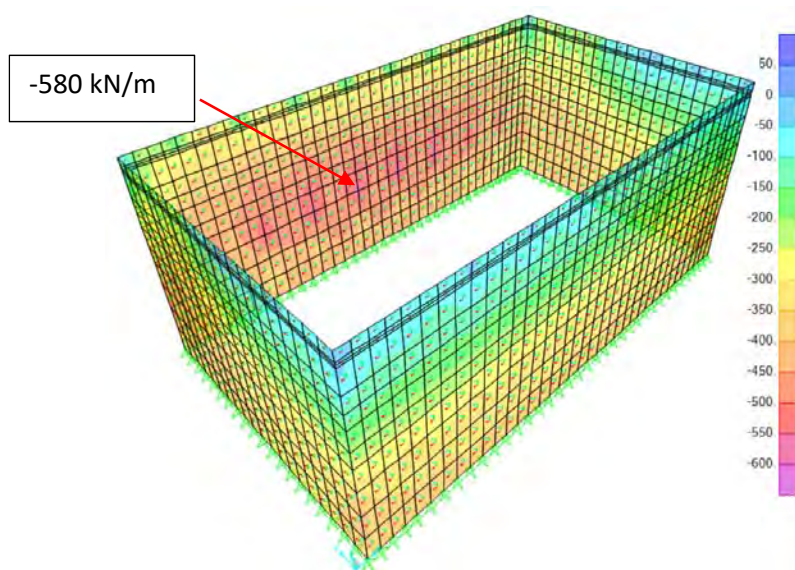


Figura 55 – F22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V13:

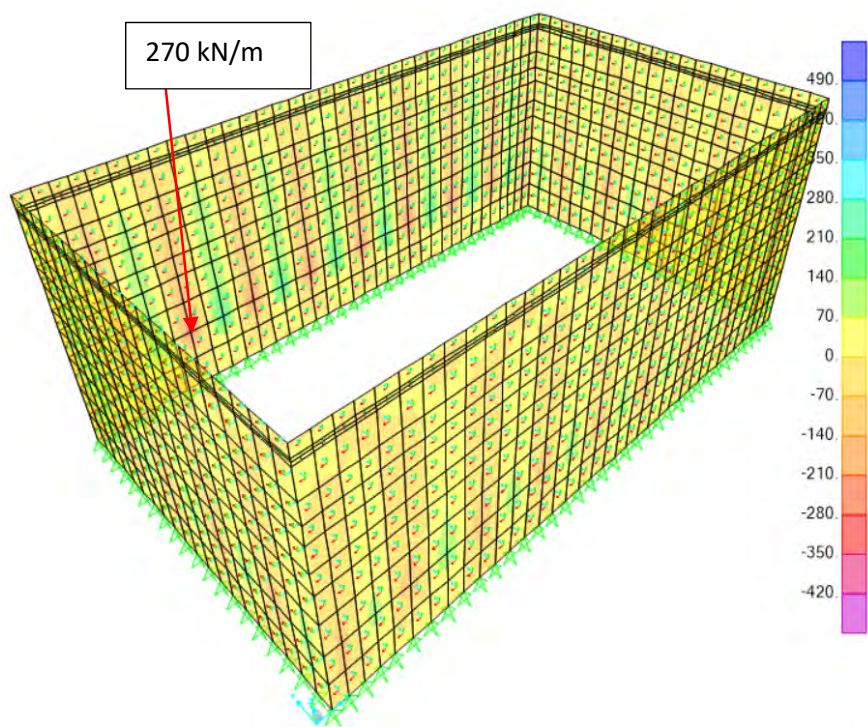


Figura 56 – V13 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V23:

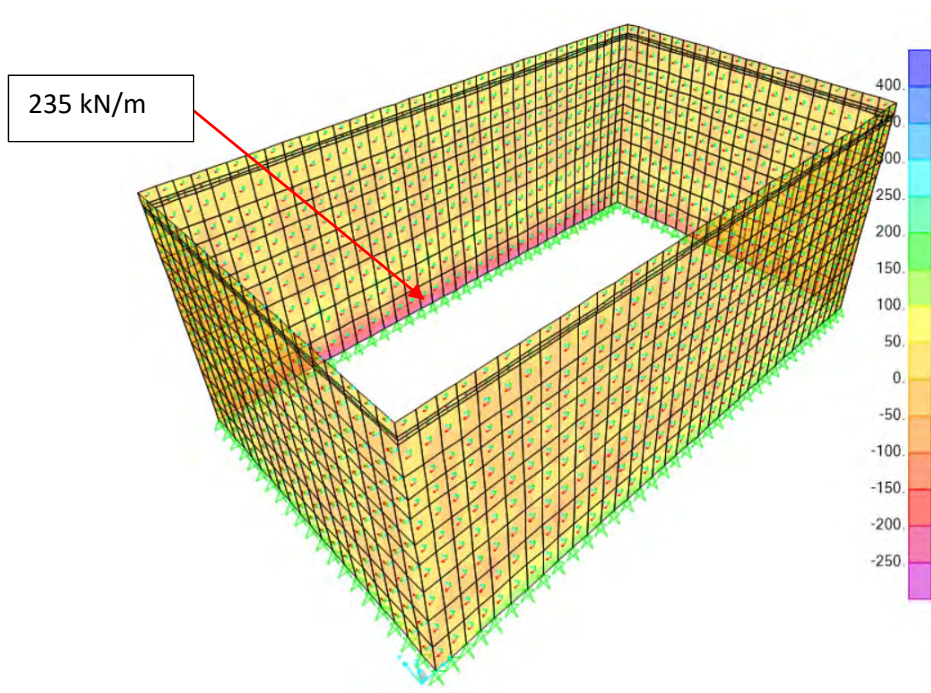


Figura 57 – V23 ELU Cresta de la ola



### Paredes interiores

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje horizontal:

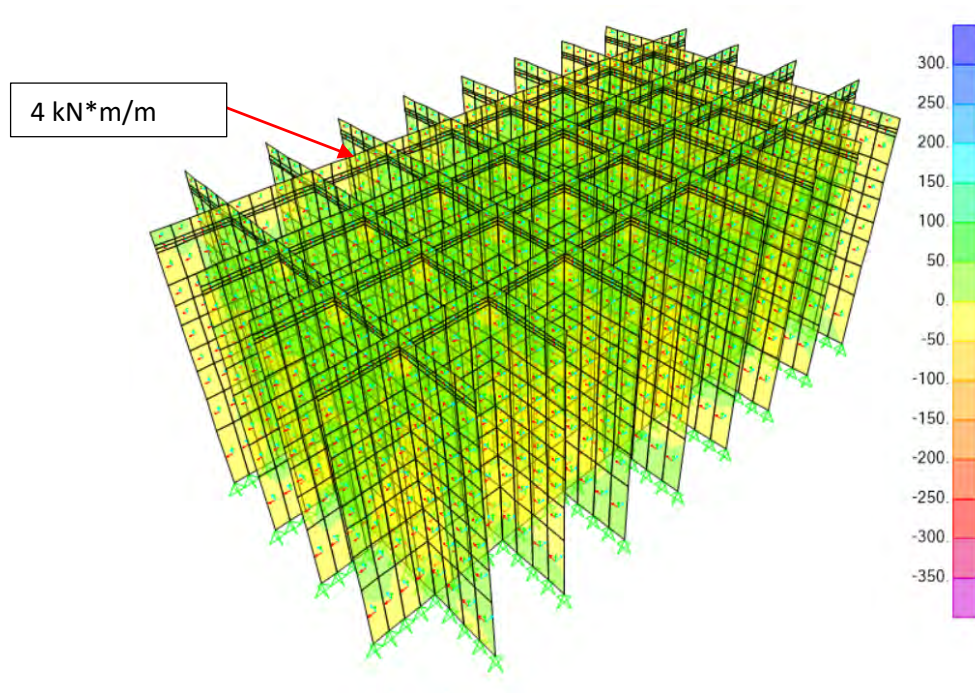


Figura 58 – M22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje vertical:

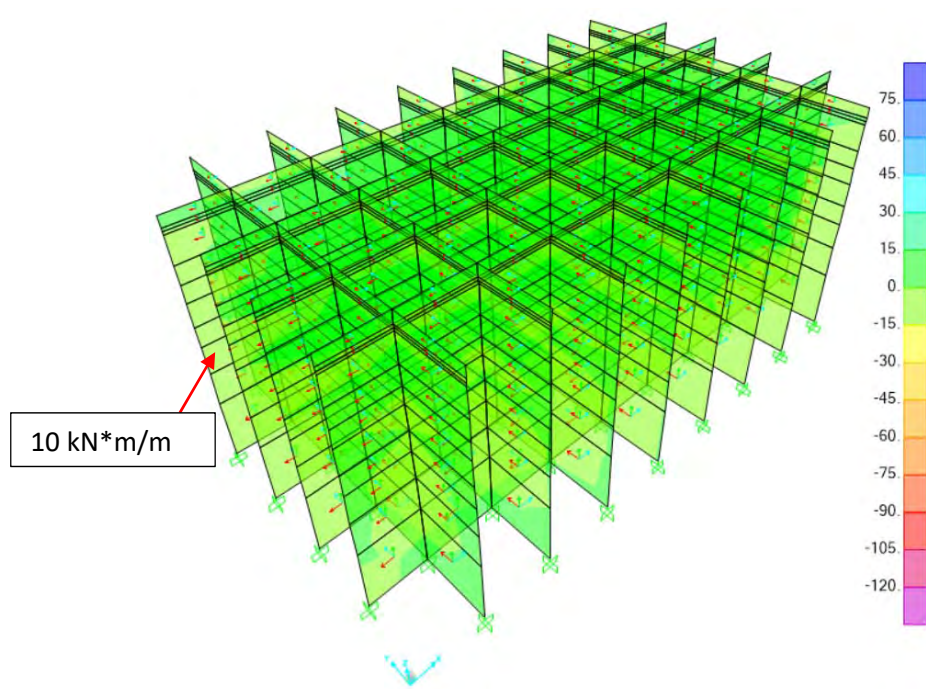


Figura 59 – M11 ELU Cresta de la ola



Los resultados para las paredes interiores del momento torsor M12:

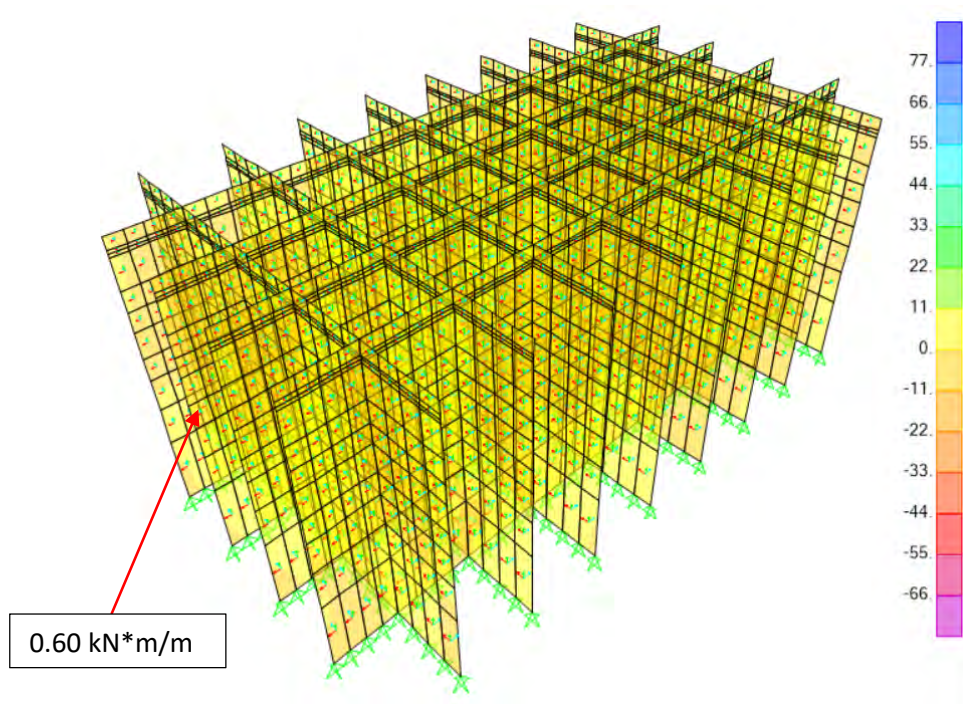


Figura 60 – M12 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje horizontal:

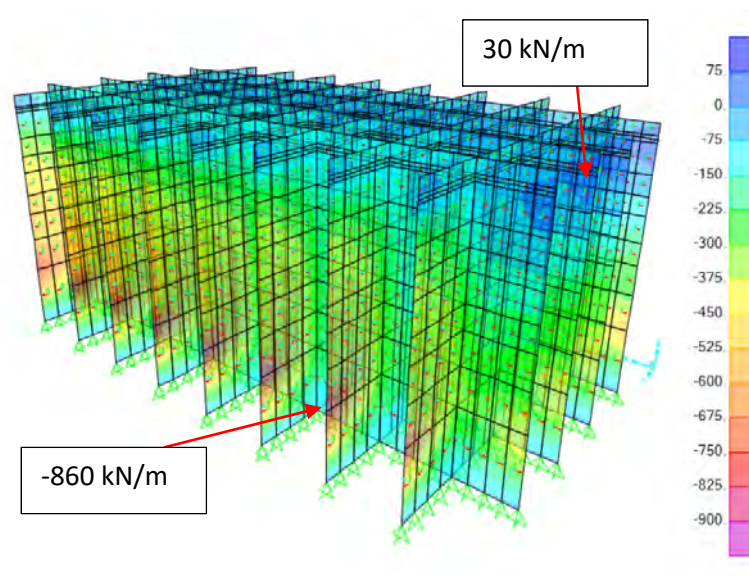


Figura 61 – F11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje vertical:

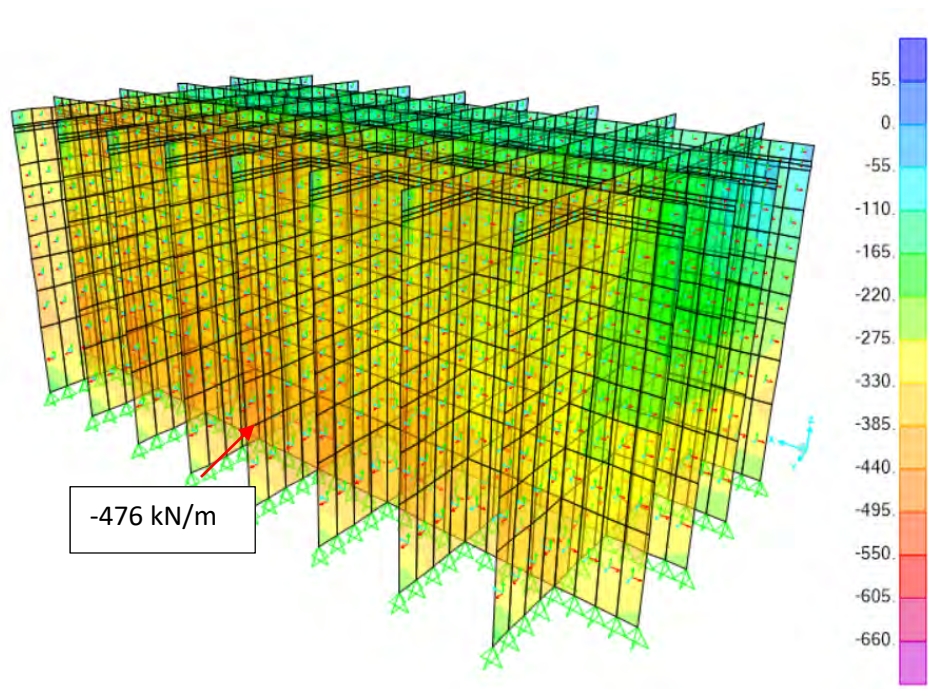


Figura 62 – F22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del cortante V13:

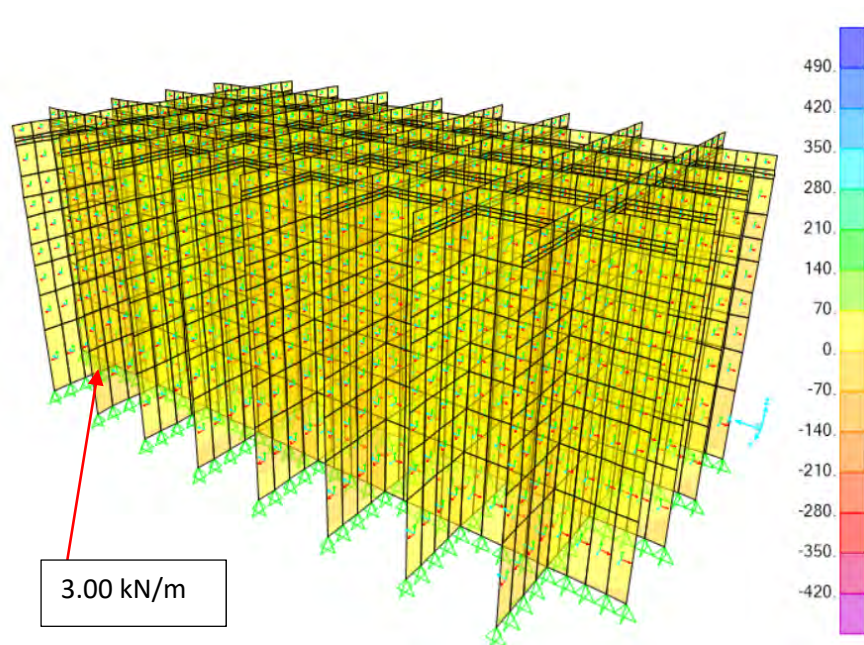


Figura 63 – V13 ELU Cresta de la ola



Los resultados para las paredes interiores del cortante V23:

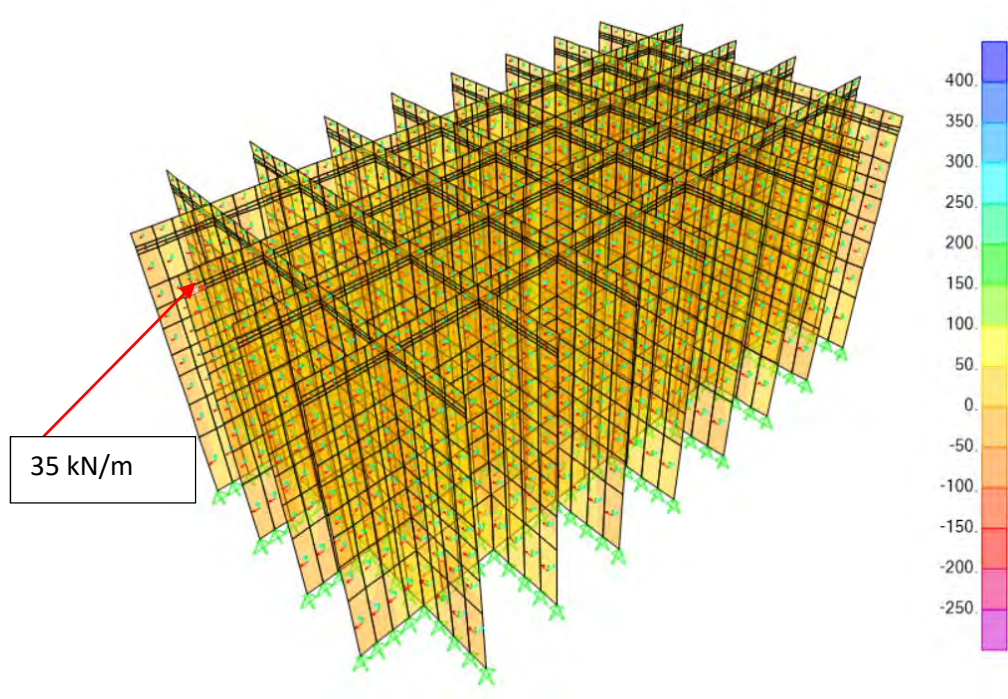


Figura 64 – V23 ELU Cresta de la ola

#### Resumen ELU celdas rectangulares

Paredes exteriores							
	M22 (kN*m/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	F11 (kN/m)	F22 (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)
ELU Flotación	40	69	8	-115	-258.3	50	52
ELU Fondeo	76	120	14	20/-190	-240	90	63
ELU Cresta de la ola	298	417	35	15/-300	-580	270	235
ELU Seno de la ola	260	320	32	60/-290	-915	210	210

Paredes interiores							
	M22 (kN*m/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	F11 (kN/m)	F22 (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)
ELU Flotación	2.1	3.5	0.6	6/-210	-160	0.8	0.8
ELU Fondeo	3	6	0.4	18/-340	17/-130	3	4.4
ELU Cresta de la ola	4	10	0.6	30/-860	-476	3	35
ELU Seno de la ola	2.2	3.6	1	140/-670	-580	2.4	20

### 3.6.3. ELS

En este caso también se muestra solamente los resultados de la combinación ELS Cresta d ela ola, el resto de resultados se encuentran en el anejo

#### *Paredes exteriores*

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje horizontal:

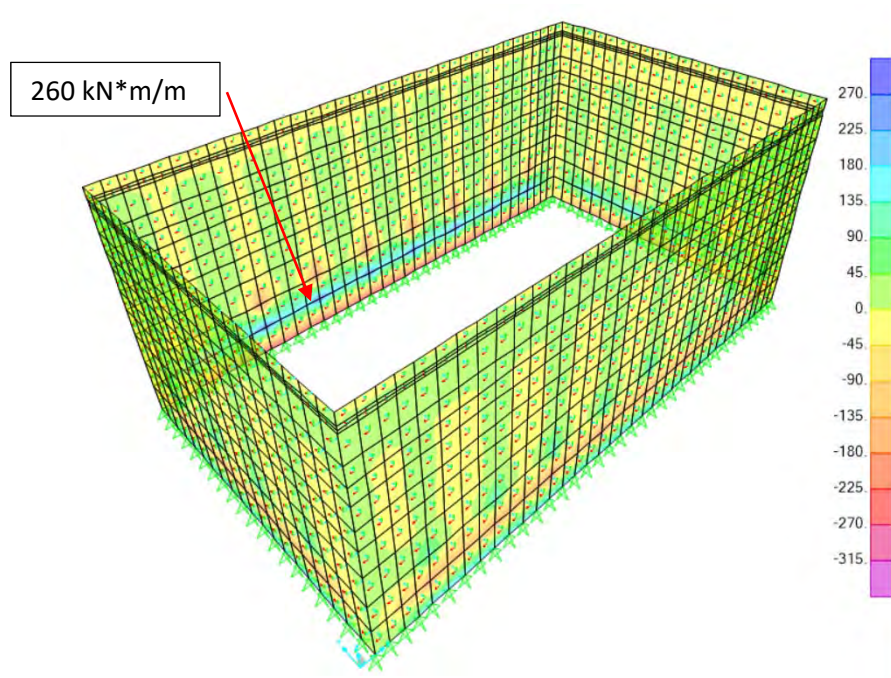


Figura 65 – M22 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje vertical:

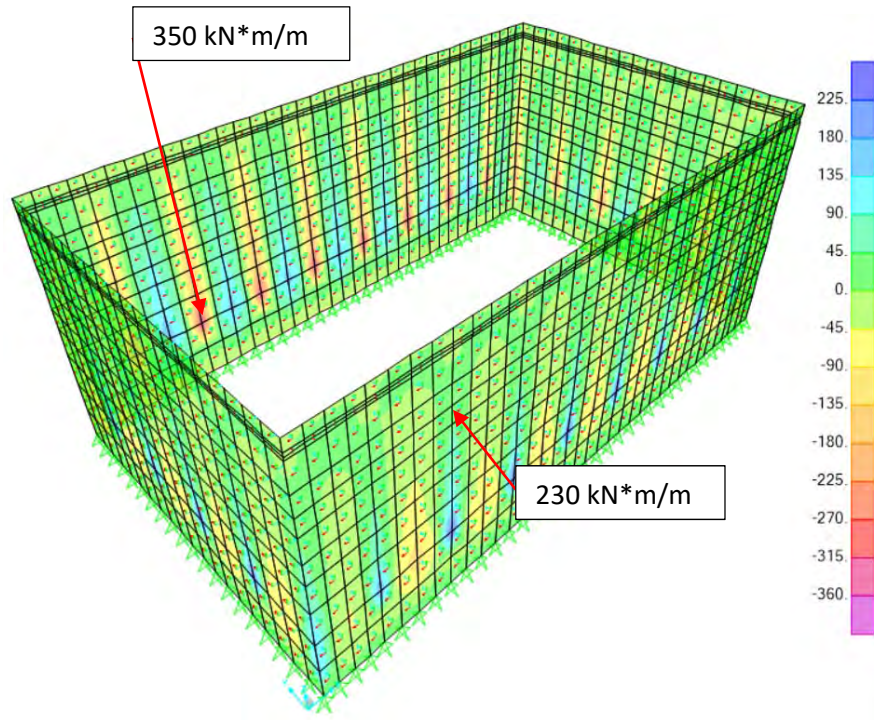


Figura 66 – M11 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento torsor M12:

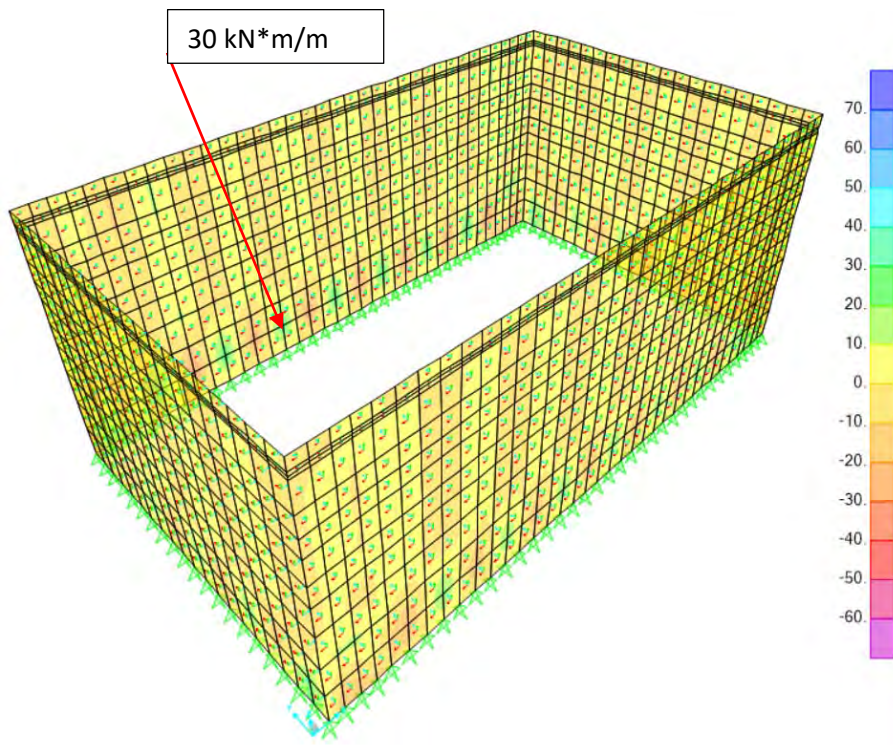


Figura 67 – M12 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje horizontal:

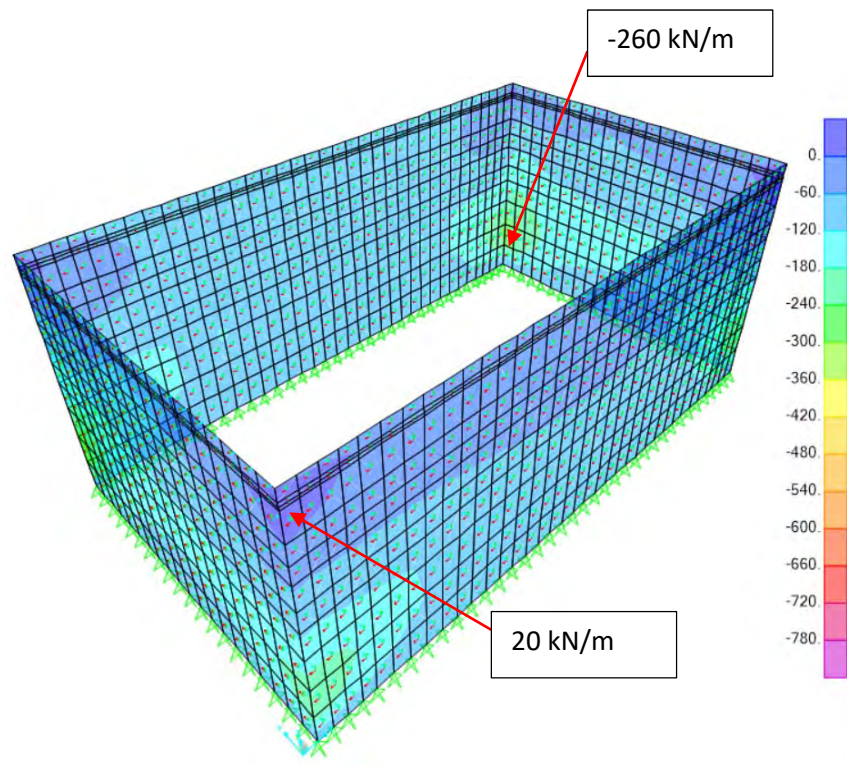


Figura 68 – F11 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje vertical:

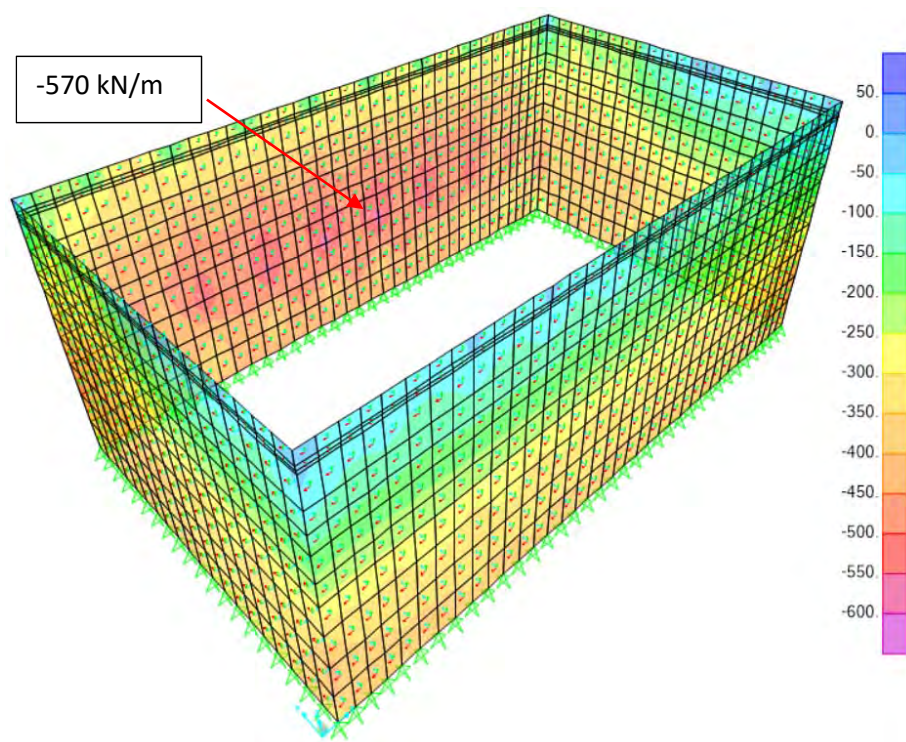


Figura 69 – F22 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V13:

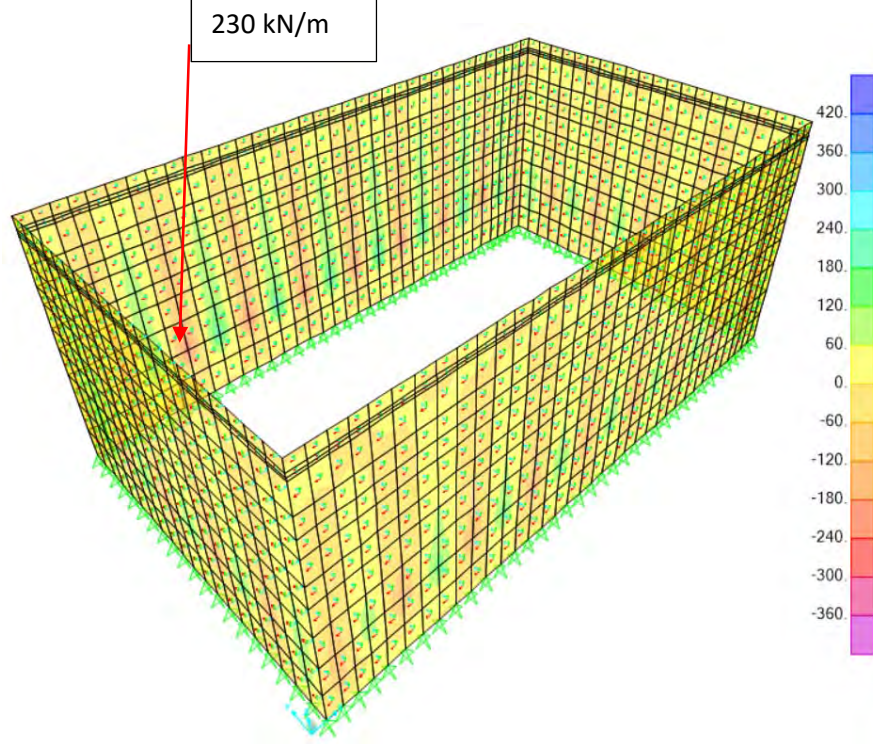


Figura 70 – V13 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V23:

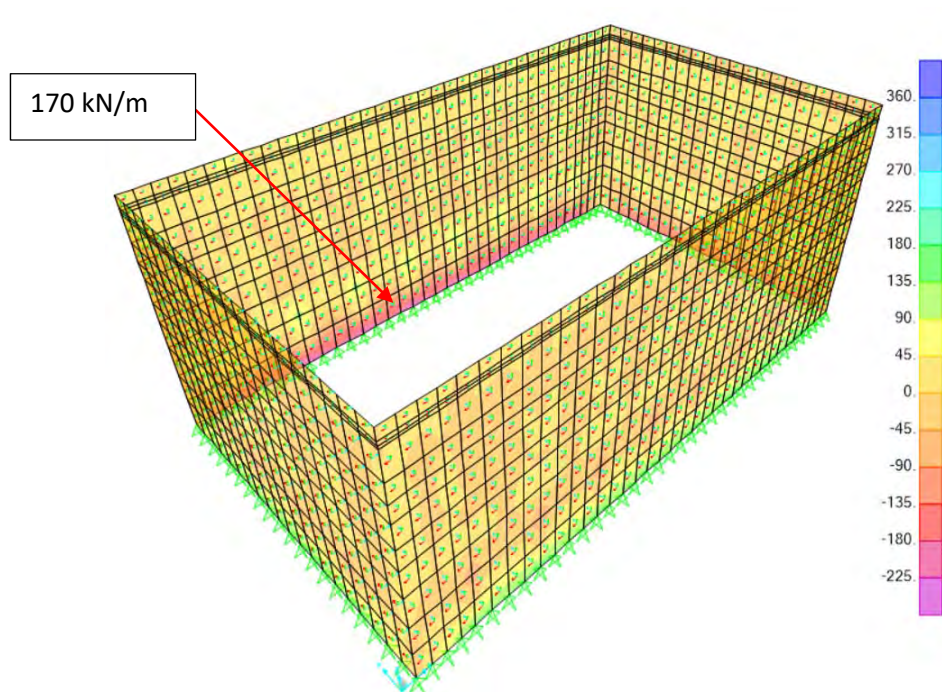


Figura 71 – V23 ELS Cresta de la ola



### Paredes interiores

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje horizontal:

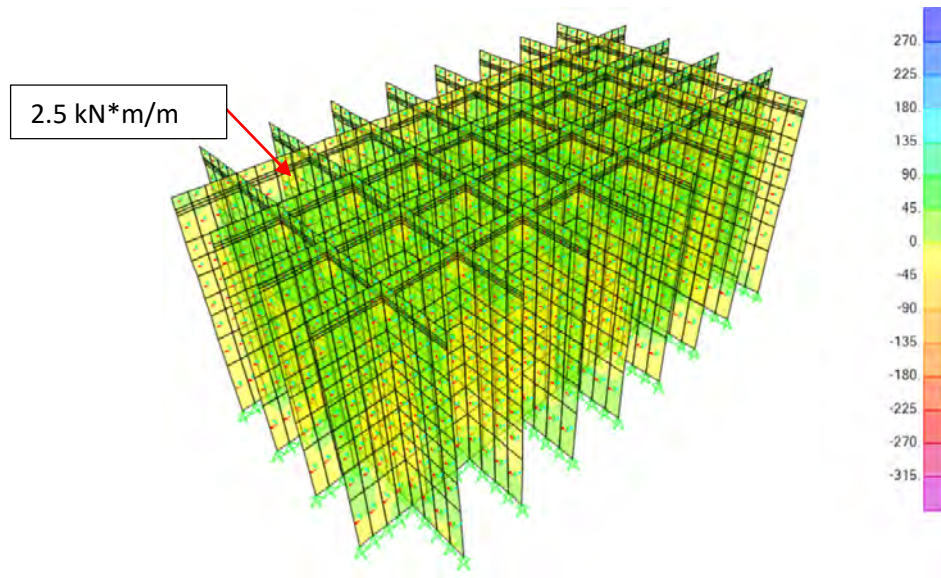


Figura 72 – M22 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje vertical:

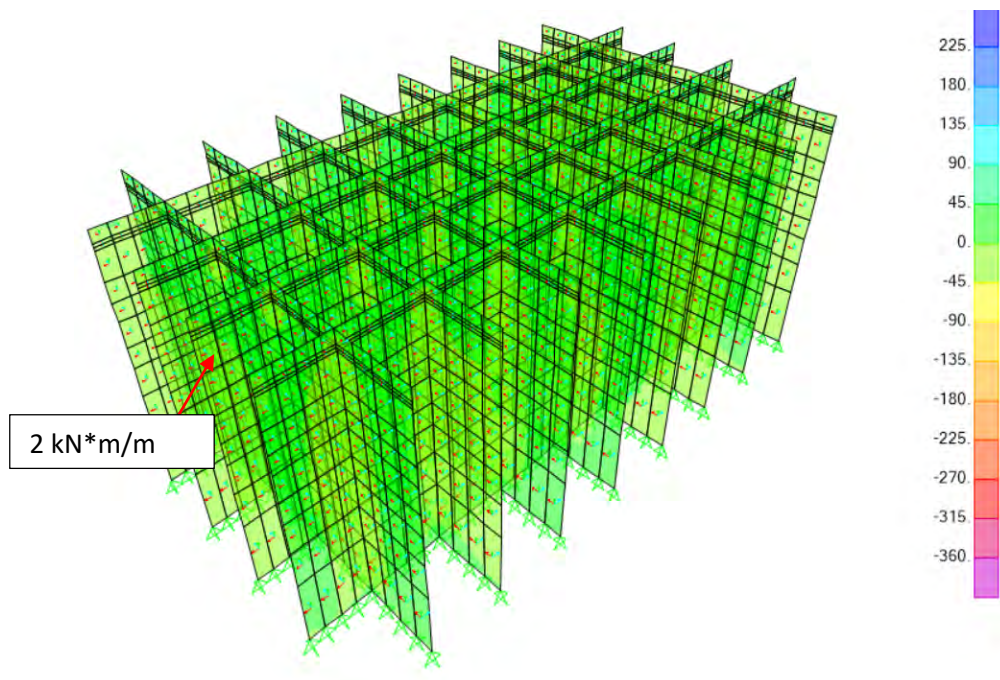


Figura 73 – M11 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento torsor M12:

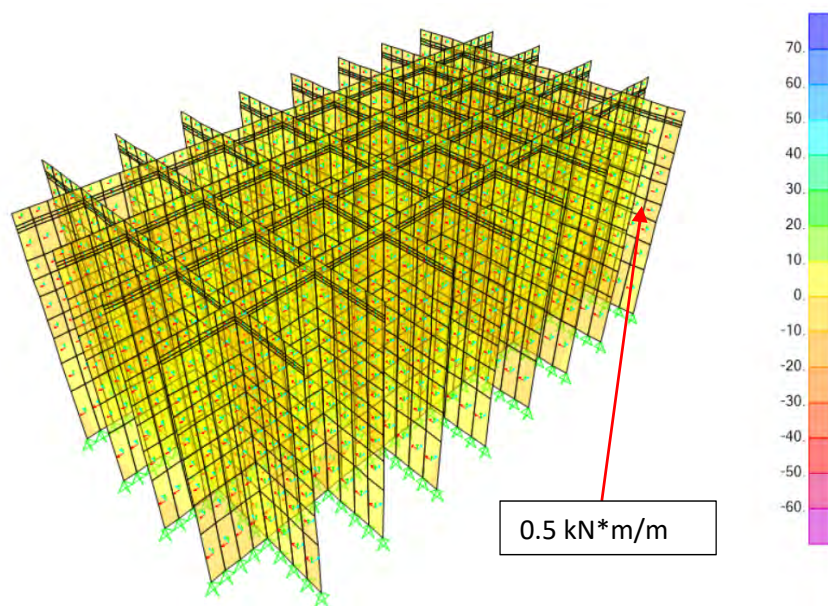


Figura 74 – M12 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje horizontal:

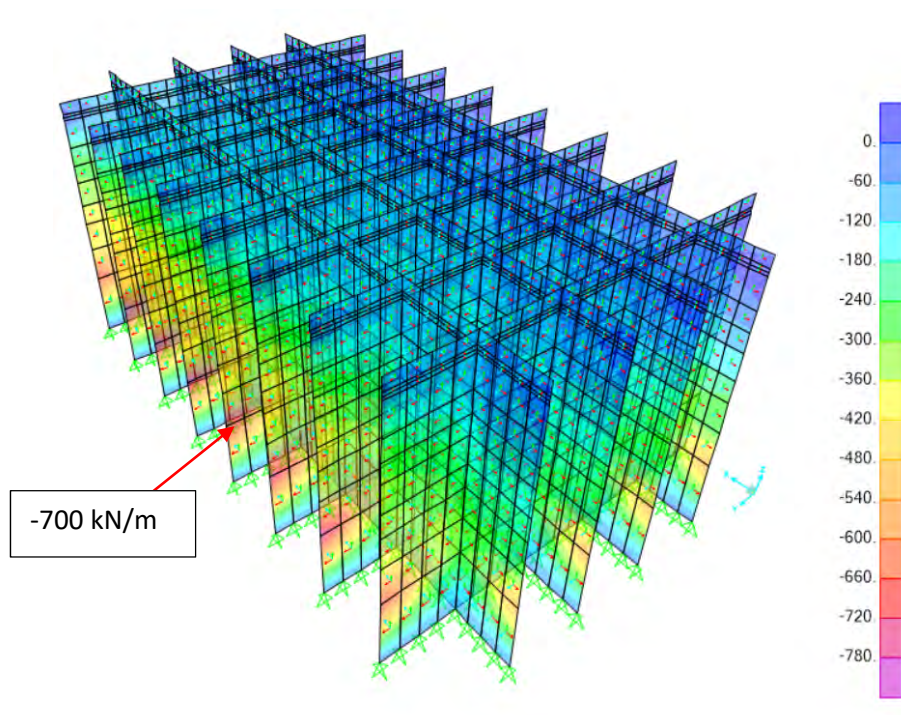


Figura 75 – F11 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje vertical:

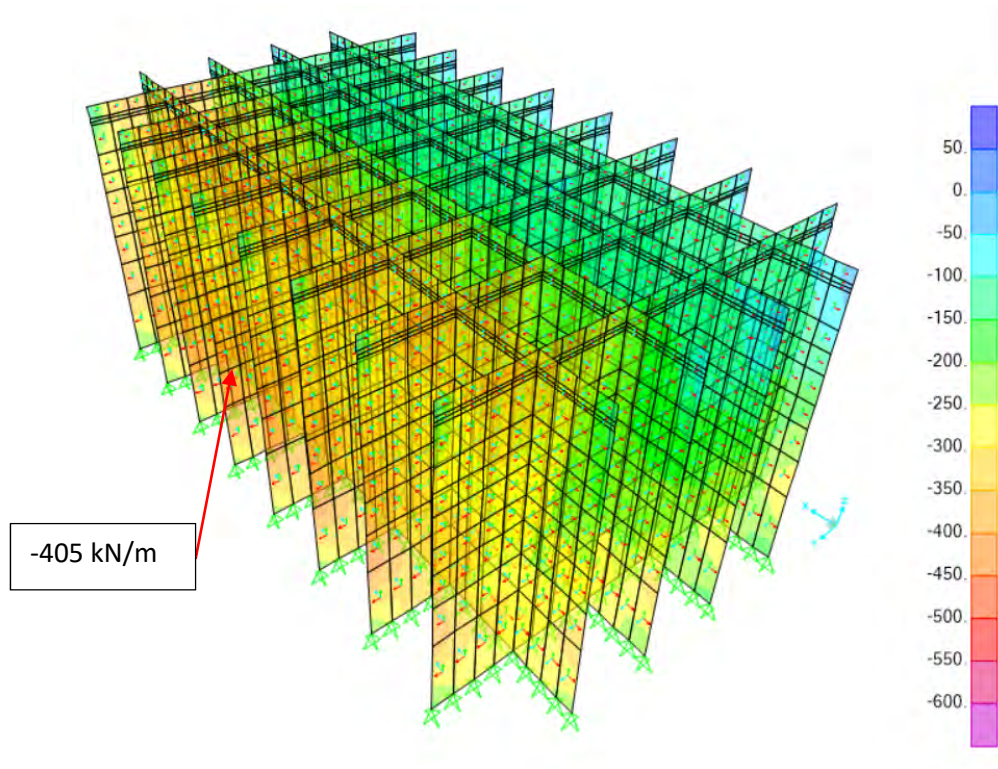


Figura 76 – F22 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del cortante V13:

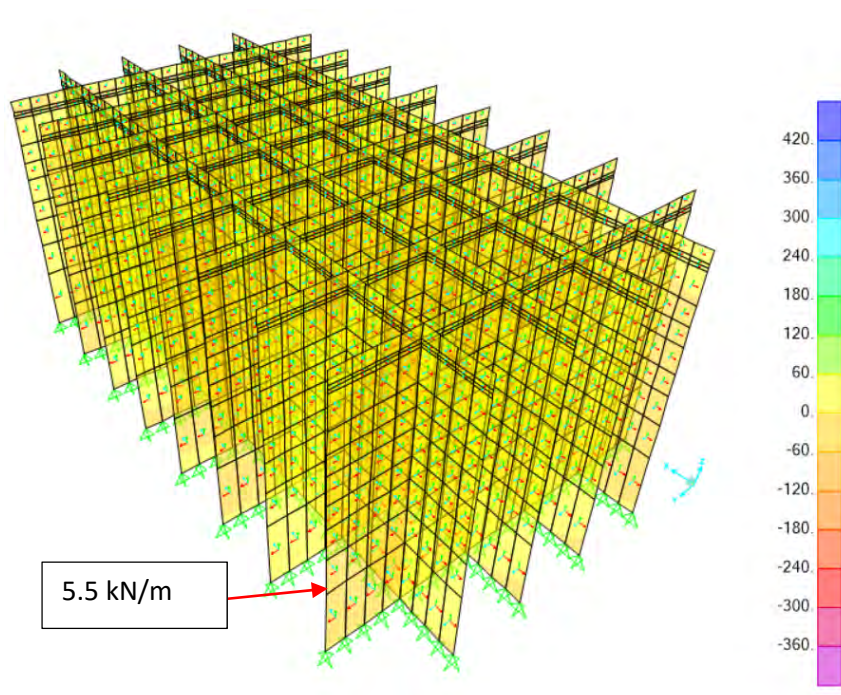


Figura 77 – V13 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del cortante V23:

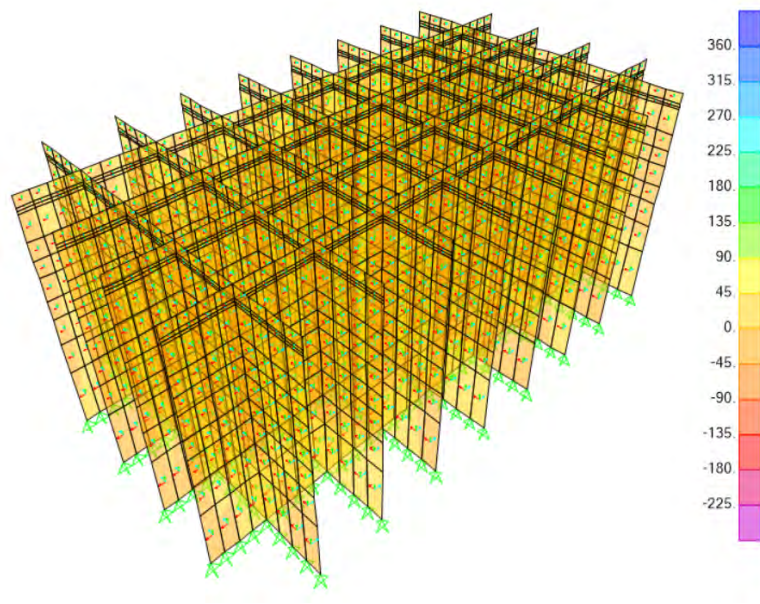


Figura 78 – V23 ELS Cresta de la ola

#### Resumen ELS celdas rectangulares

Paredes exteriores							
	M22 (kN*m/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	F11 (kN/m)	F22 (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)
ELS Cresta de la ola	260	350	30	20/-260	-570	230	170
ELS Seno de la ola	170	230	24	37/-220	-660	160	120

Paredes interiores							
	M22 (kN*m/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	F11 (kN/m)	F22 (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)
ELS Cresta de la ola	2.5	5	0.5	-700	-405	5.5	15
ELS Seno de la ola	1.7	1.6	0.7	85/-520	-400	2.7	9

### 3.7. Resultados modelo celdas circulares

Una vez creados los modelos, introducidas las cargas y las combinaciones se procede a correr los modelos y a obtener los resultados del modelo con celdas circulares. Para el modelo de celdas circulares se obtienen dos valores para cada caso. Estos son el valor máximo del momento, cortante o axil estudiado en la sección con espesor máximo (e1) y la sección con espesor mínimo (e2). Solo se muestran los resultados de las combinaciones ELU Cresta de la ola y ELS Cresta de la ola, el resto de resultados se encuentran en el anejo.

#### 3.7.1. ELU

##### *Paredes exteriores*

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje horizontal:

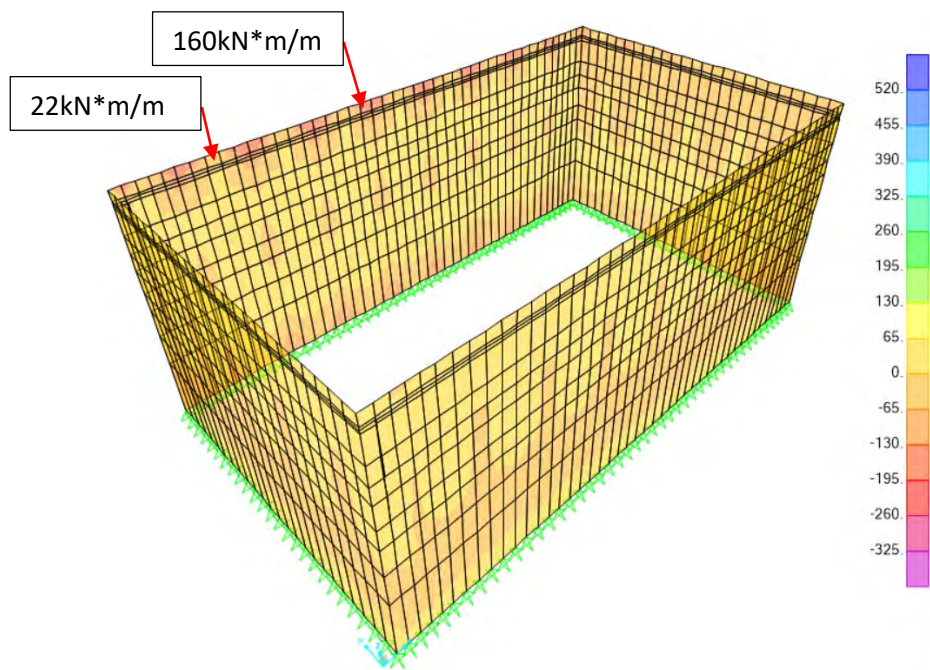


Figura 79 – M22 ELU Cresta de la ola



Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje vertical:

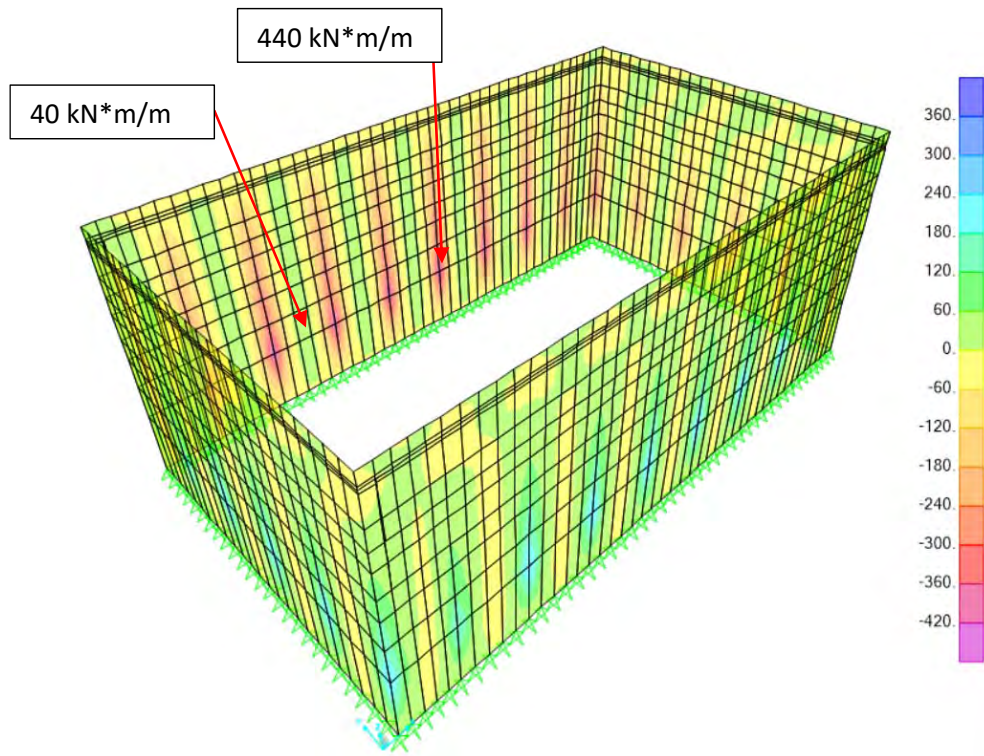


Figura 80 – M11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento torsor M12:

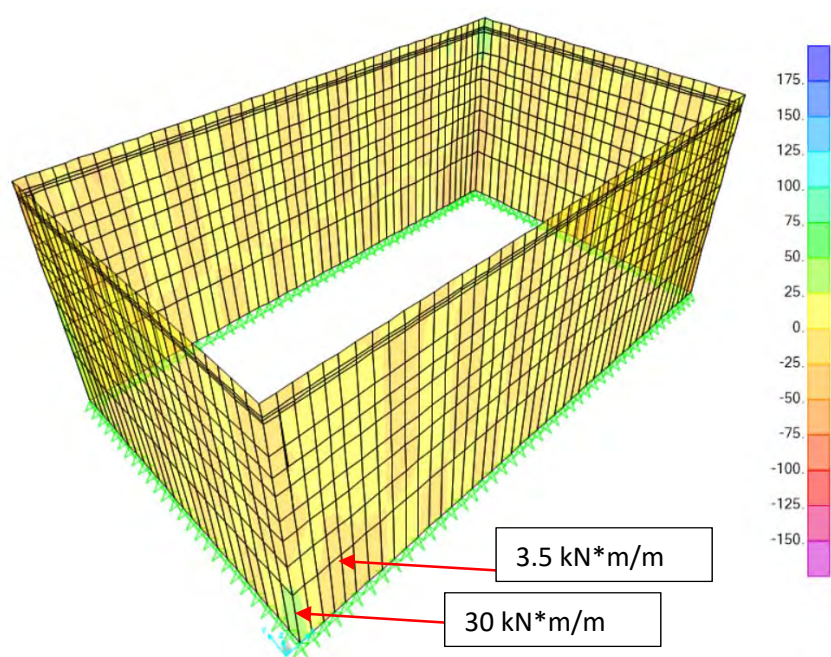


Figura 81 – M12 ELU Cresta de la ola



Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje horizontal:

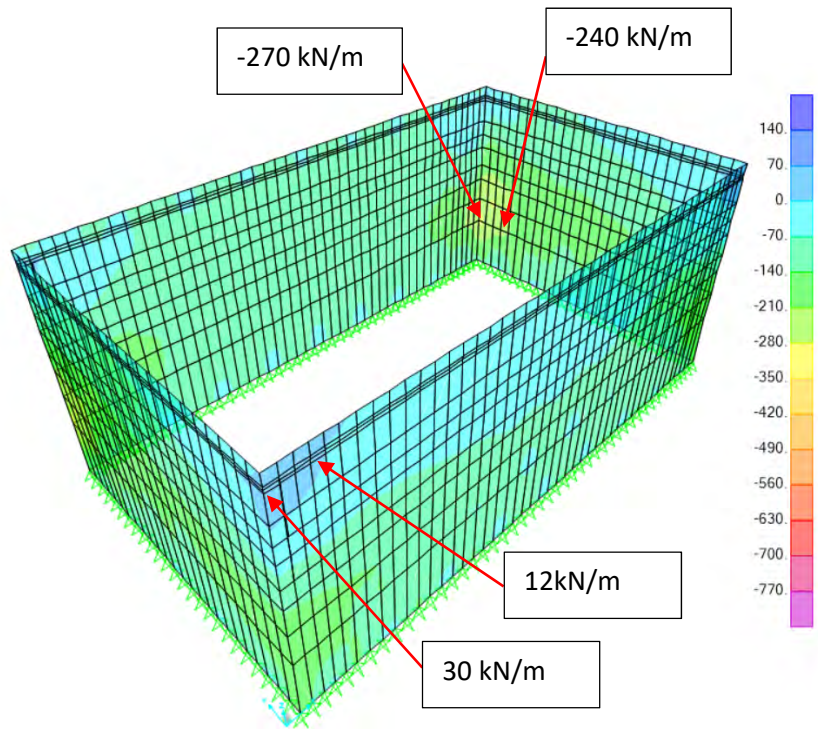


Figura 82 – F11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje vertical:

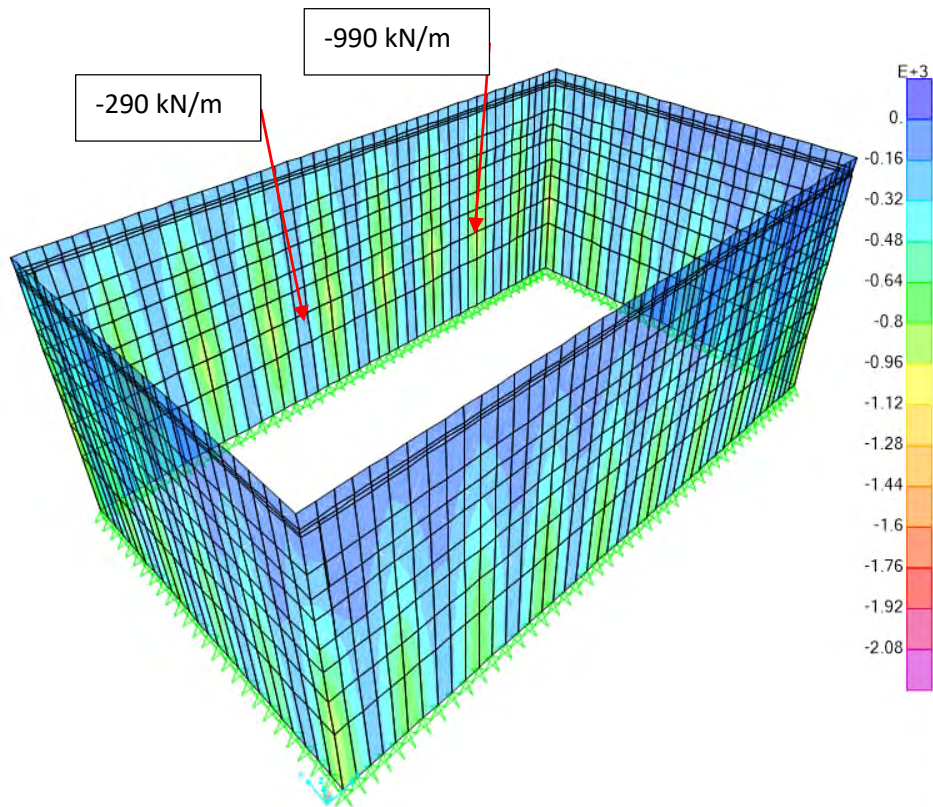


Figura 83 – F22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V13:

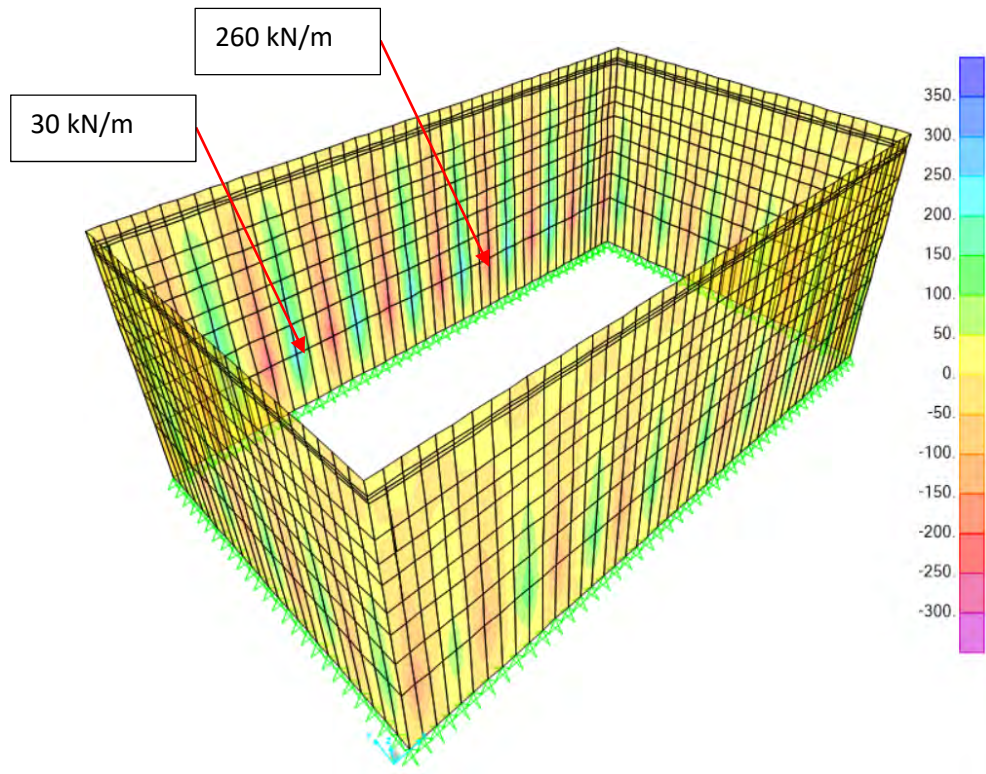


Figura 84 – V13 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V23:

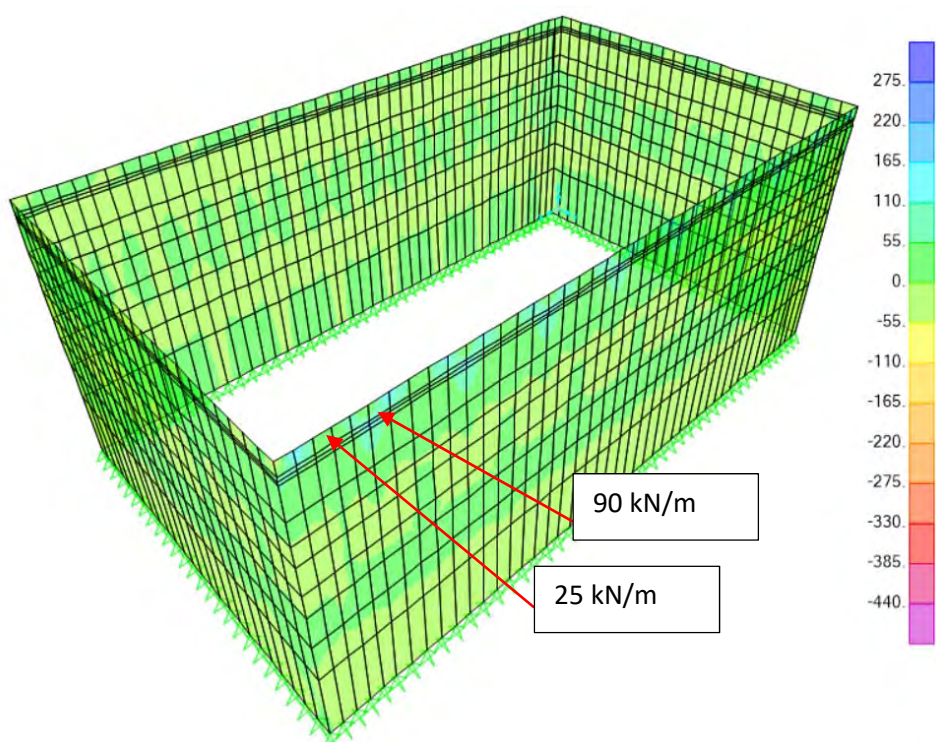


Figura 85 – V23 ELU Cresta de la ola



### Paredes interiores

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje horizontal:

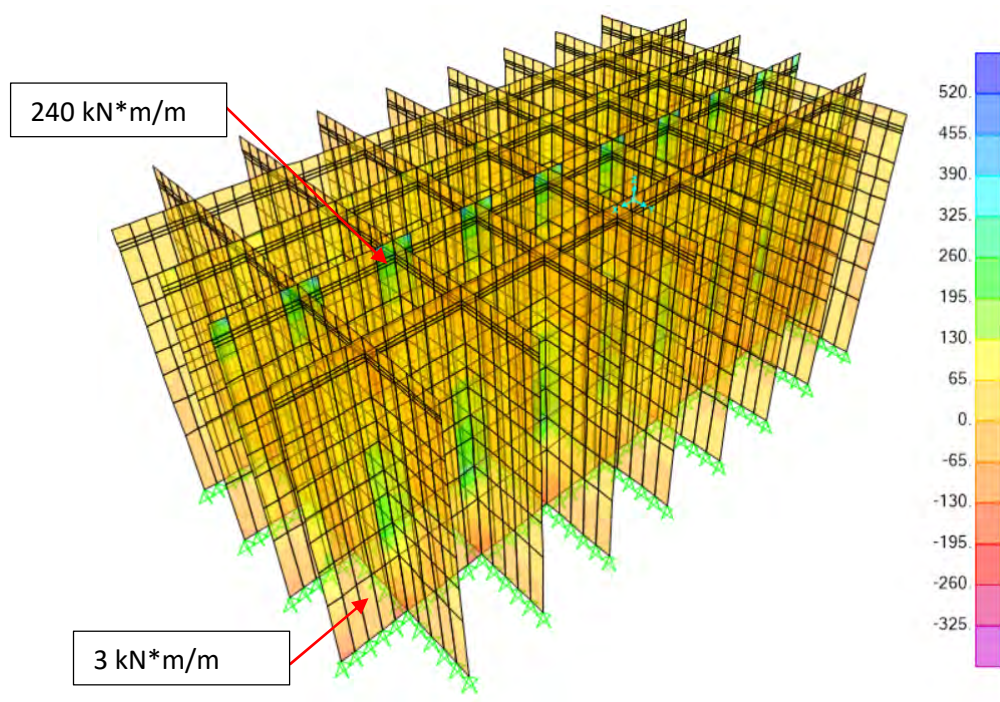


Figura 86 – M22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje vertical:

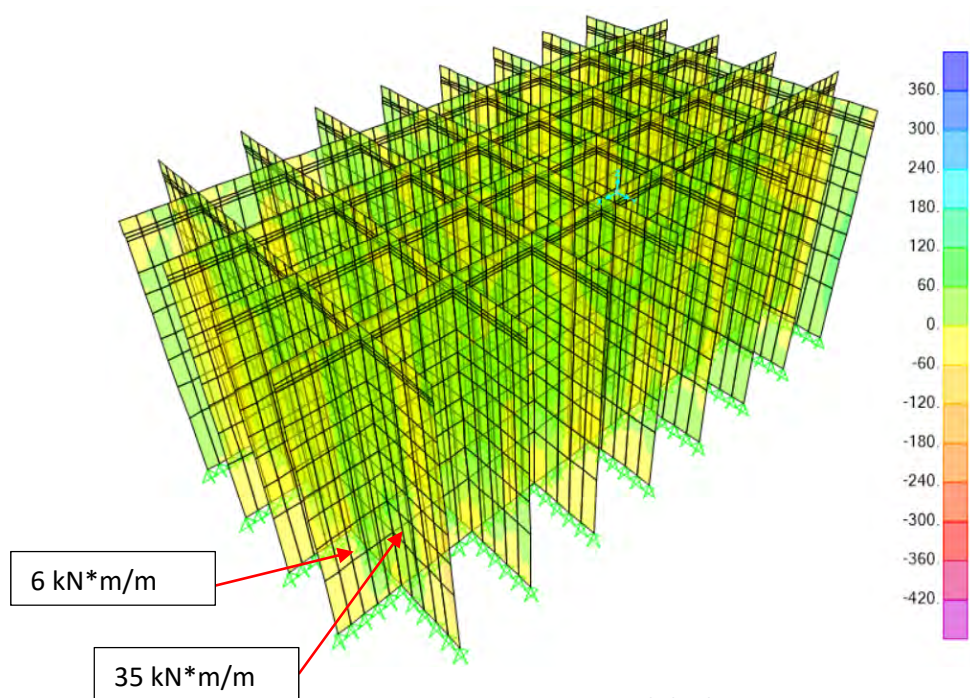


Figura 87 – M11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento torsor M12:

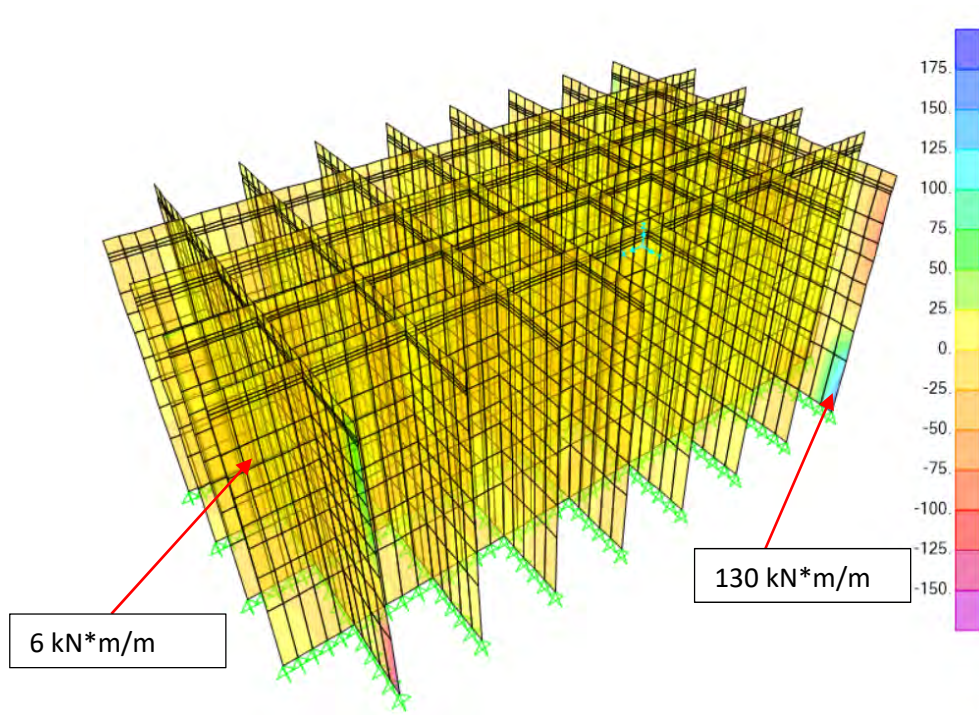


Figura 88 – M12 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje horizontal:

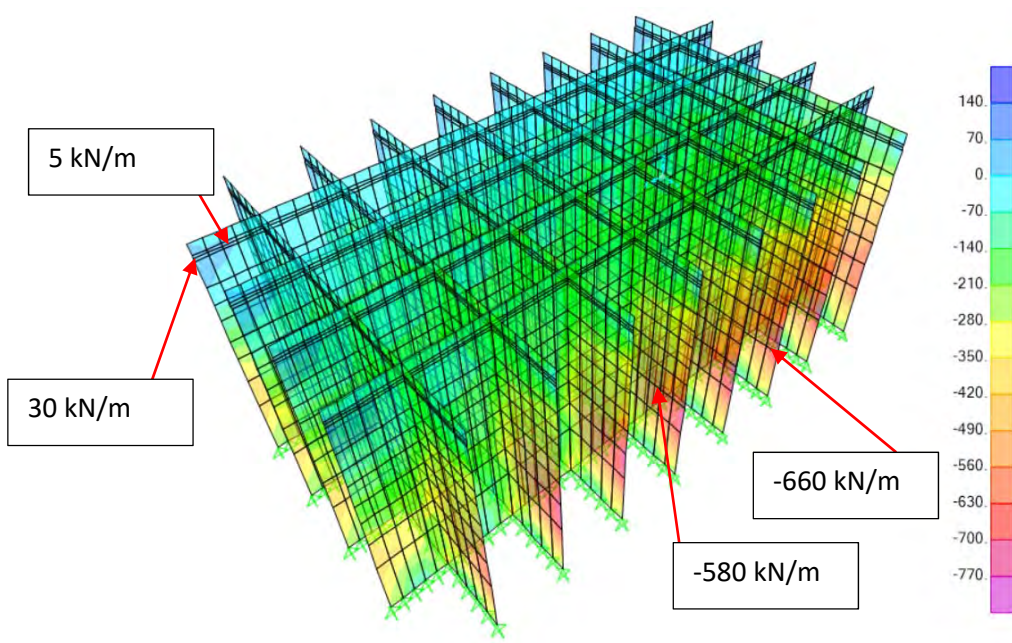


Figura 89 – F11 ELU Cresta de la ola



Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje vertical:

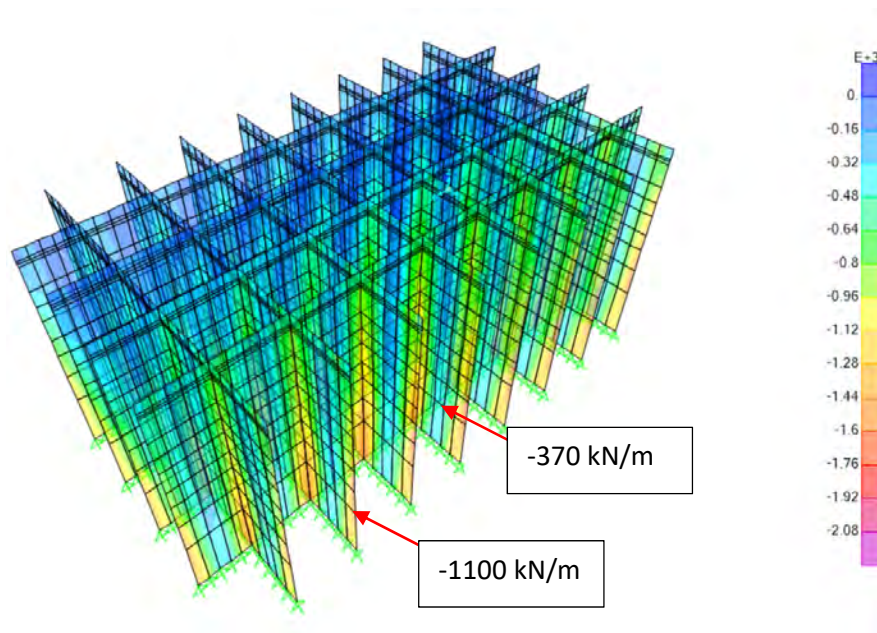


Figura 90 – F22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del cortante V13:

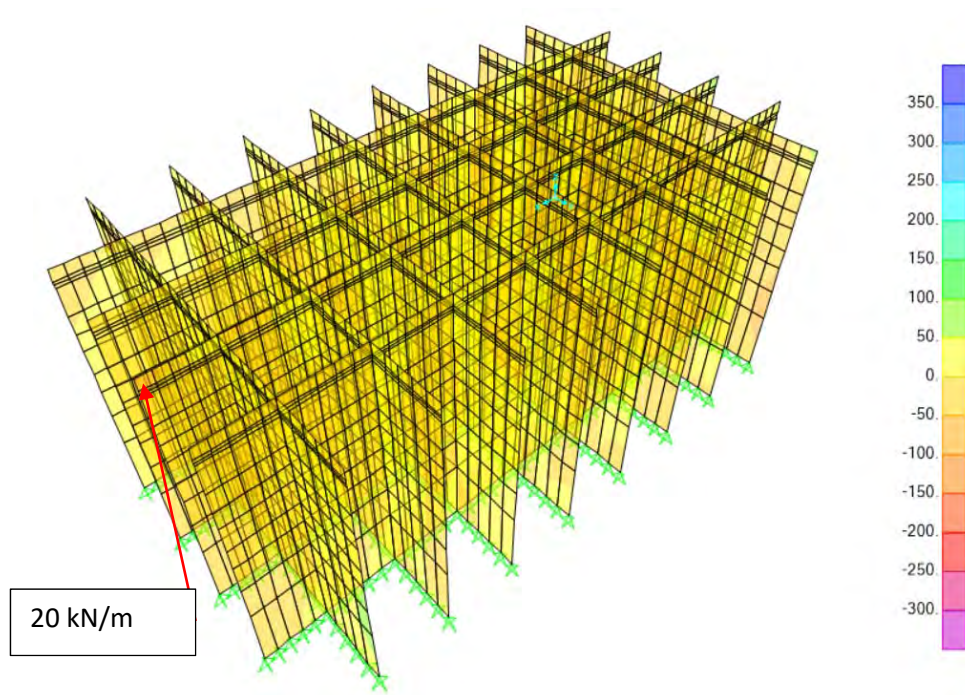


Figura 91 – V13 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del cortante V23:

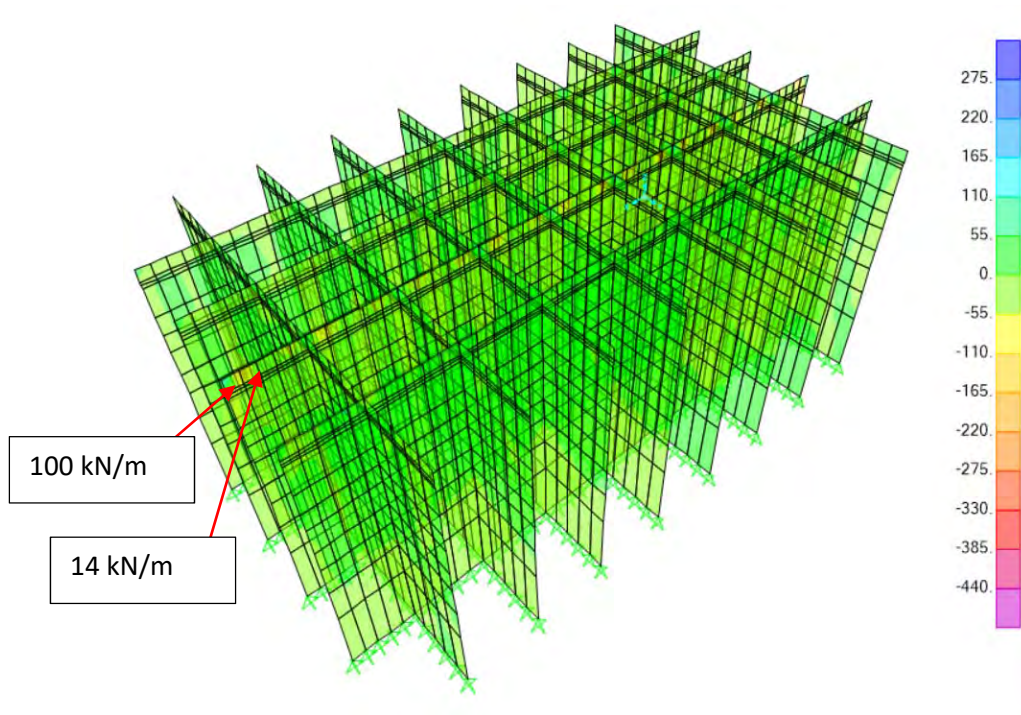


Figura 92 – V23 ELU Cresta de la ola

### Resumen ELU celdas circulares

Paredes exteriores														
	M22 (kN*m/m)		M11 (kN*m/m)		M12 (kN*m/m)		F11 (kN/m)		F22 (kN/m)		V13 (kN/m)		V23 (kN/m)	
	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2
ELU Flotación	31	9	108	10	12	6	5/-80	5/-50	-390	-120	60	8	6	1.8
ELU Fondeo	41	13	230	20	25	8	31/-210	0/-195	-410	-120	135	15	13	2
ELU Cresta de la ola	160	22	440	40	30	3.5	30/-270	12/-240	-990	-290	260	30	90	25
ELU Seno de la ola	114	7	340	31	80	8	65/-290	30/-240	-1150	-390	190	26	30	2



Paredes interiores														
	M22 (kN*m/m)		M11 (kN*m/m)		M12 (kN*m/m)		F11 (kN/m)		F22 (kN/m)		V13 (kN/m)		V23 (kN/m)	
	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2
ELU Flotación	25	0.5	20	1.6	28	0.5	10/-160	2/-140	-570	-140	2	2	5	0.2
ELU Fondeo	140	1.5	70	2.8	130	0.5	40/-400	0/-350	-700	-120	45	14	30	2
ELU Cresta de la ola	240	3	35	6	130	6	30/-660	5/-660	-1100	-370	20	10	100	14
ELU Seno de la ola	215	0.7	8	1.6	100	10	190/-566	150/-460	-1700	-390	3	3	50	13

### 3.7.2. ELS

#### Paredes exteriores

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje horizontal:

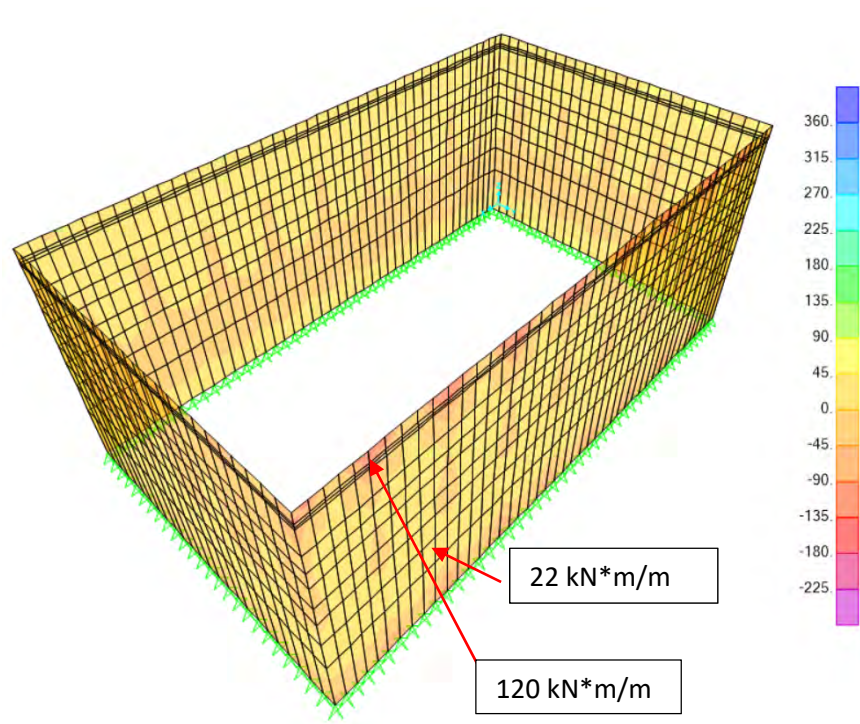


Figura 93 – M22 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje vertical:

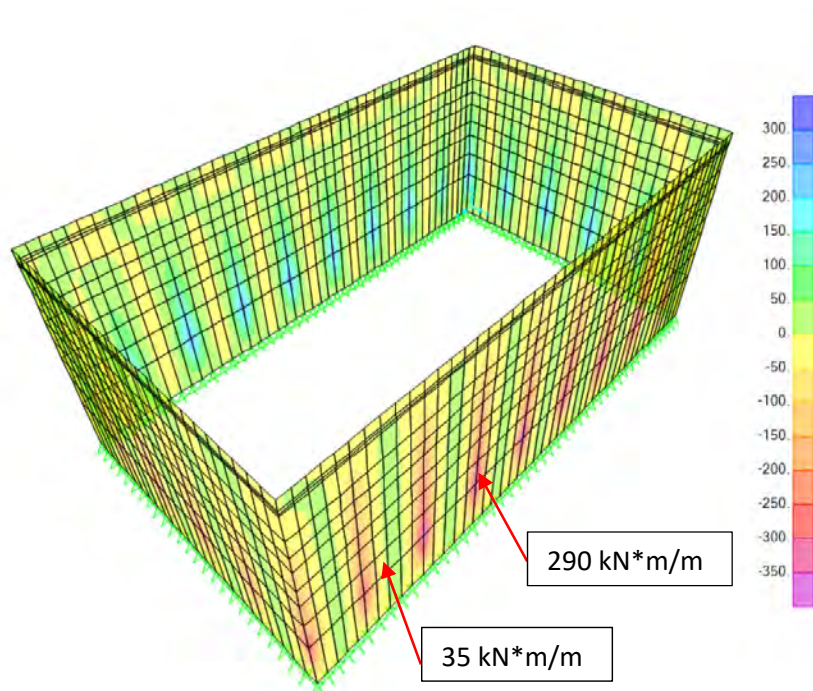


Figura 94 – M11 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento torsor M12:

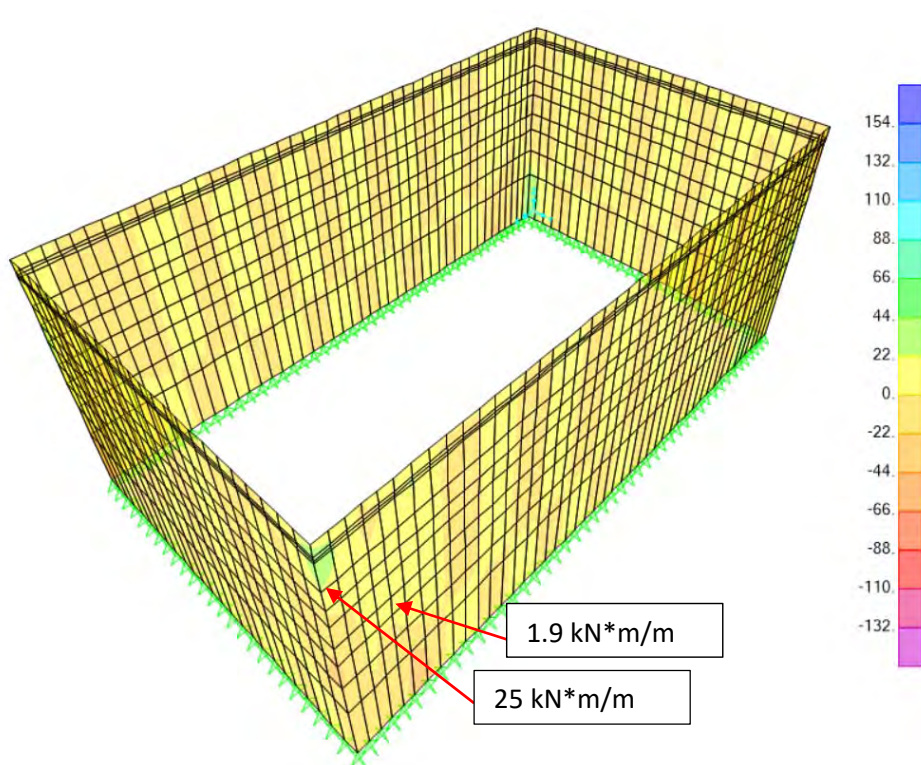


Figura 95 – M12 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje horizontal:

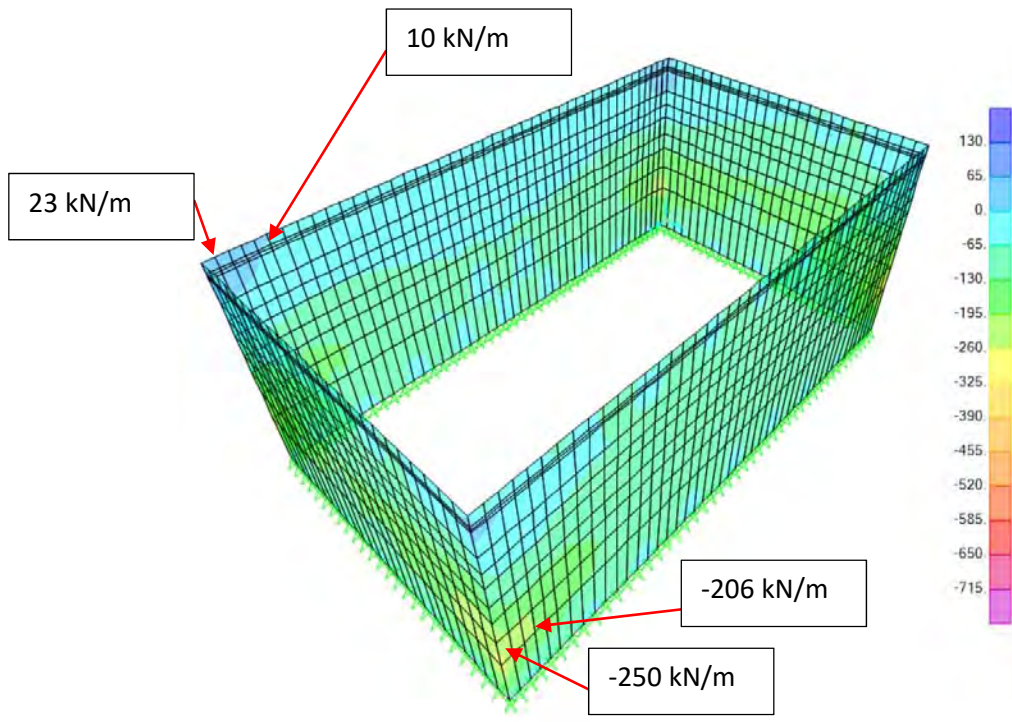


Figura 96 – F11 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje vertical:

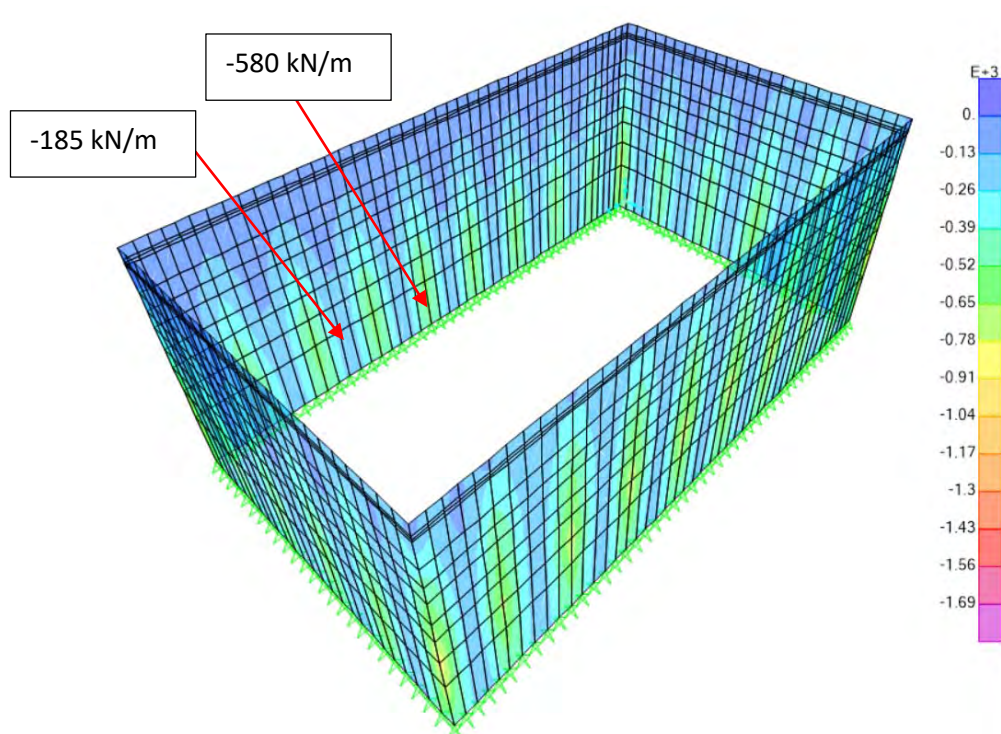


Figura 97 – F22 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes exteriores del cortante V13:

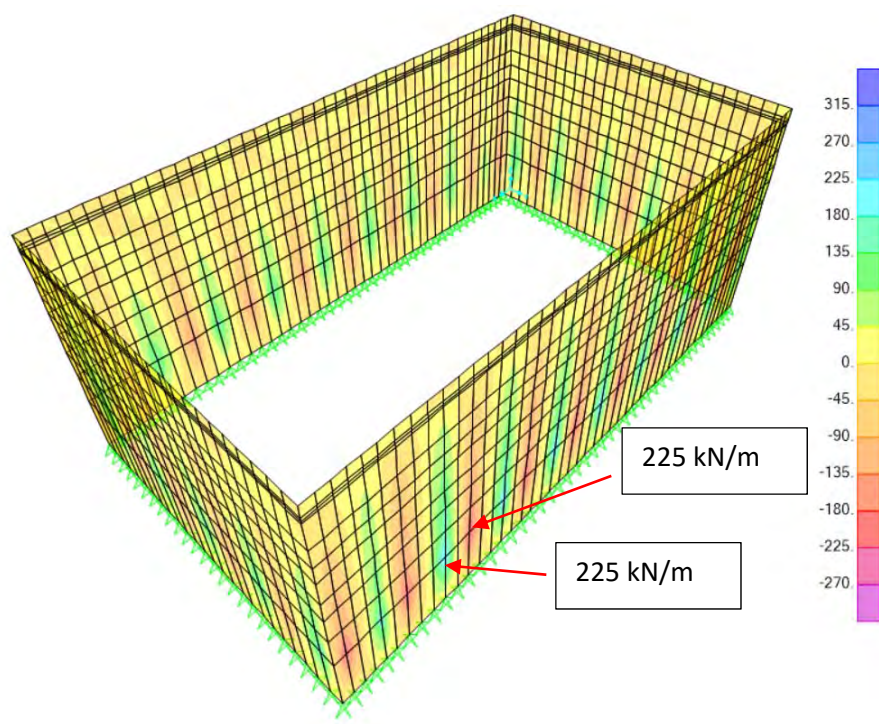


Figura 98 – V13 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V23:

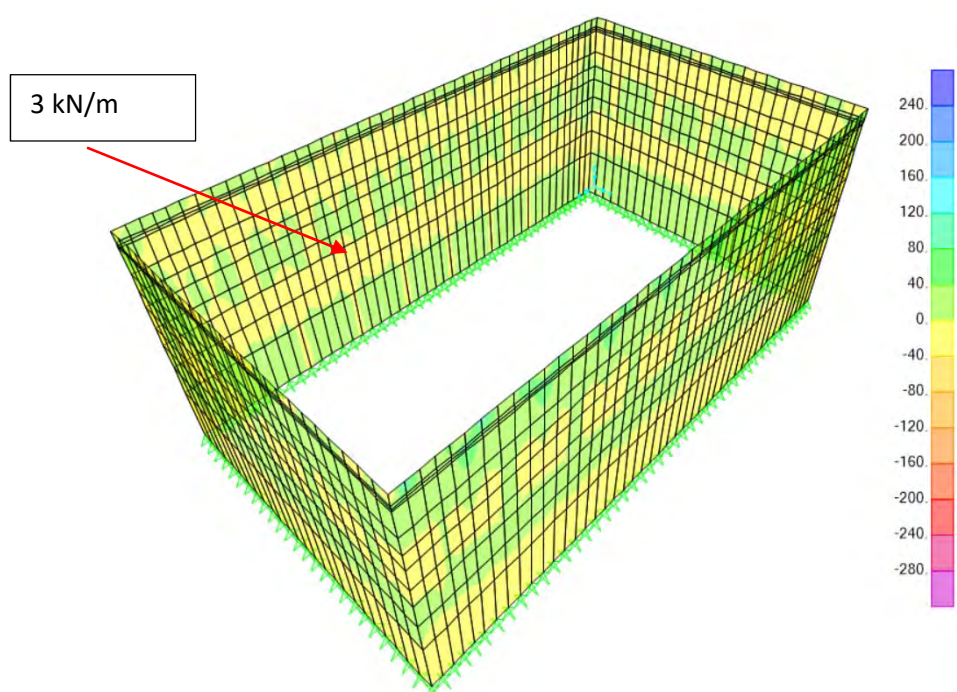


Figura 99 – V23 ELS Cresta de la ola

### Paredes interiores

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje horizontal:

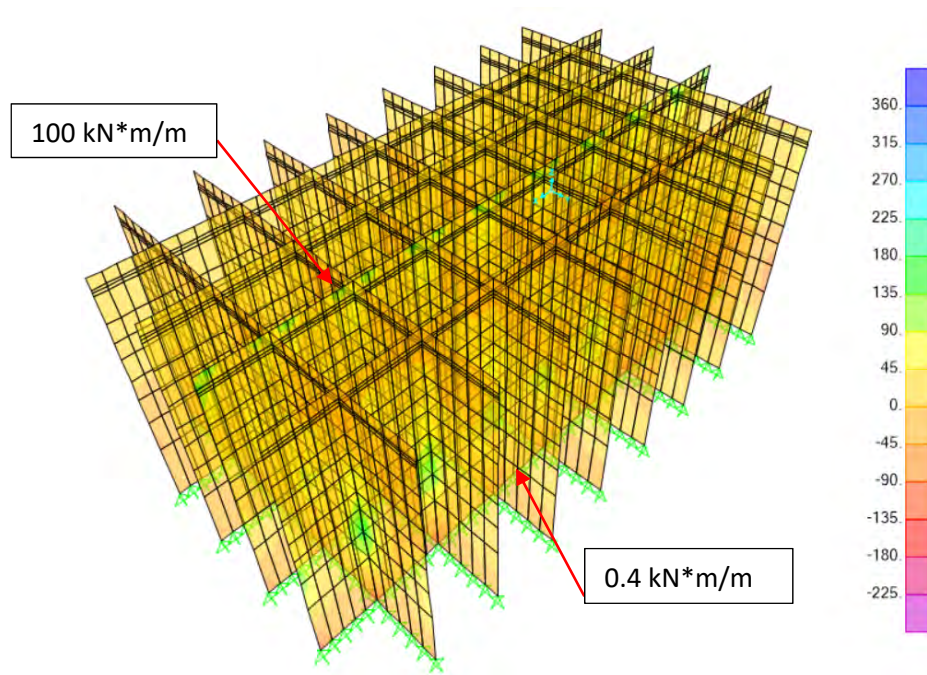


Figura 100 – M22 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje vertical:

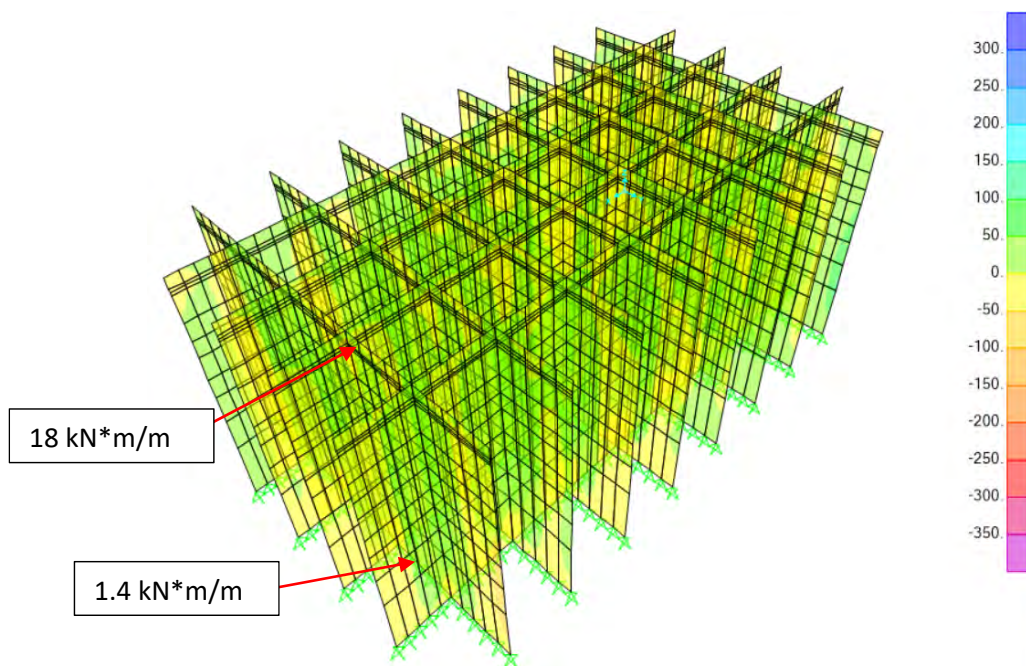


Figura 101 – M11 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes interiores del momento torsor M12:

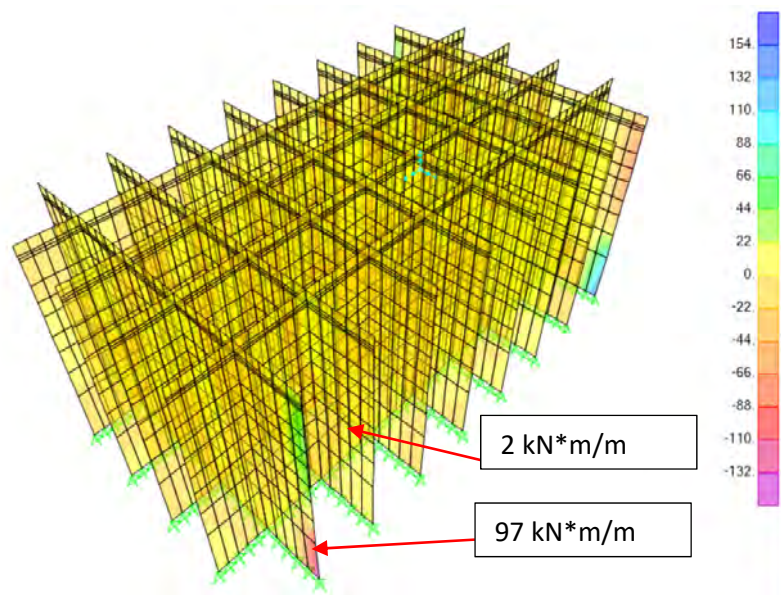


Figura 102 – M12 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje horizontal:

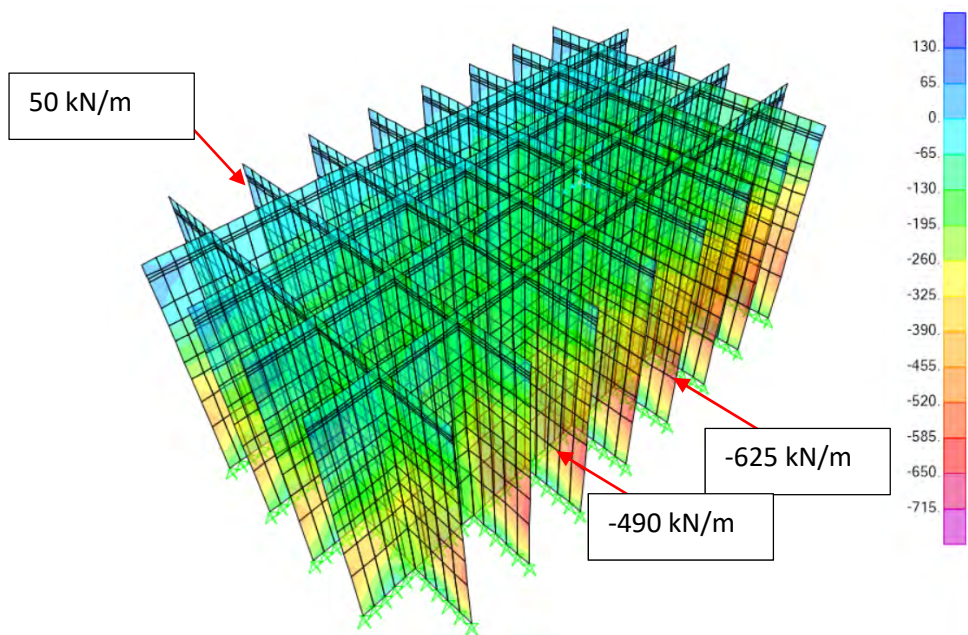
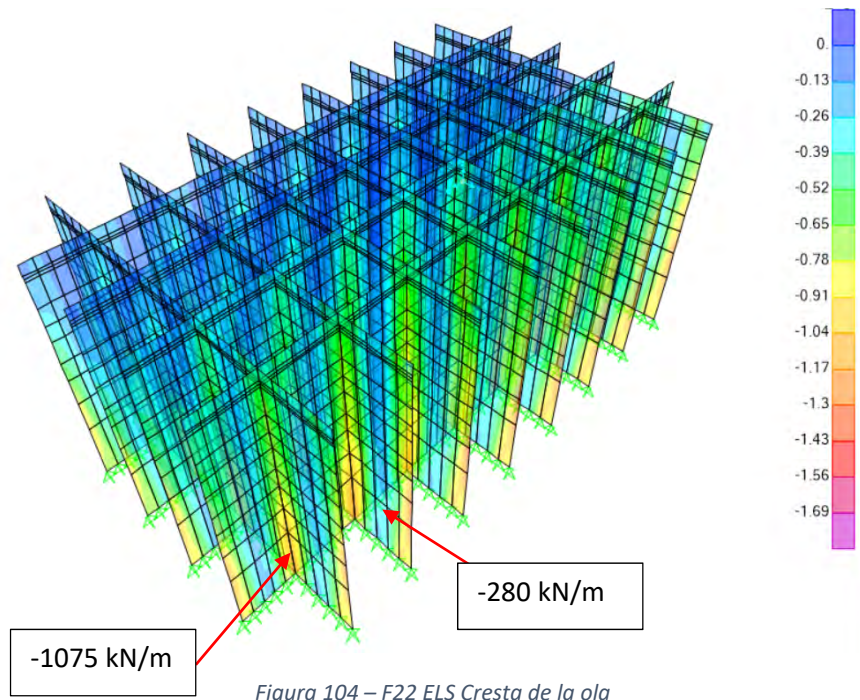
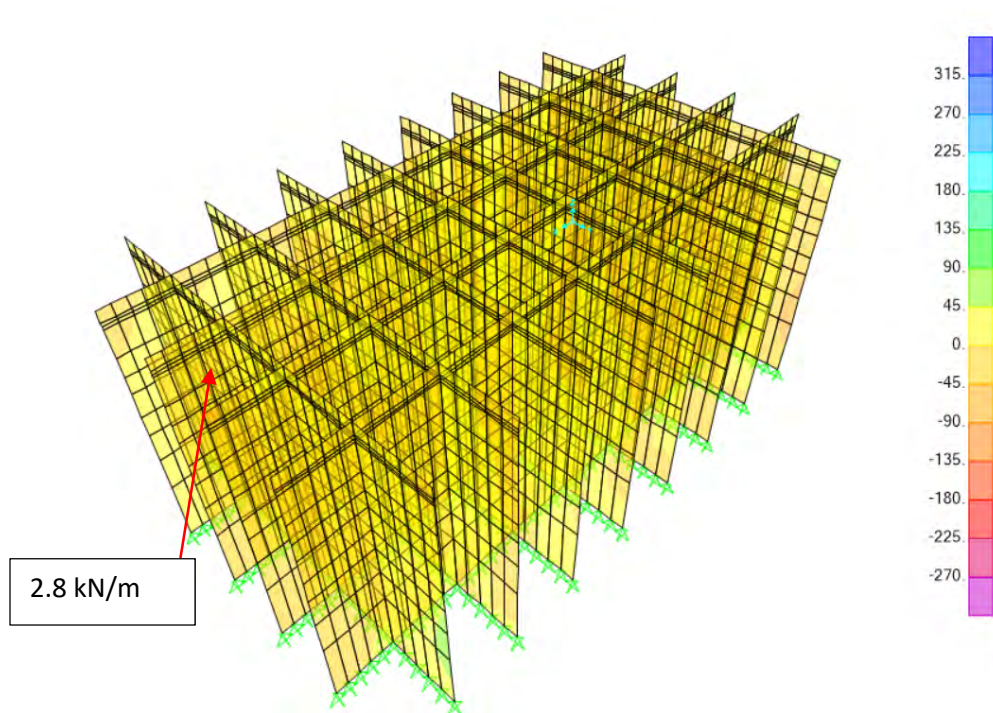


Figura 103 – F11 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje vertical:



Los resultados para las paredes interiores del cortante V13:



Los resultados para las paredes interiores del cortante V23:

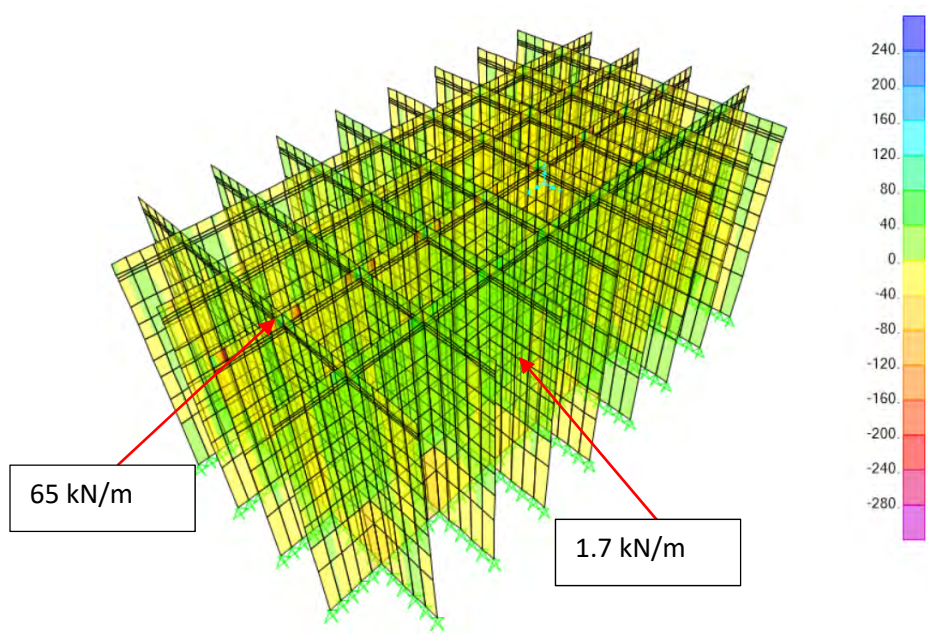


Figura 106 – V23 ELS Cresta de la ola

#### Resumen ELS celdas circulares

Paredes exteriores														
	M22 (kN*m/m)		M11 (kN*m/m)		M12 (kN*m/m)		F11 (kN/m)		F22 (kN/m)		V13 (kN/m)		V23 (kN/m)	
	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2
ELS Cresta de la ola	120	22	290	35	25	1.9	23/-250	10/-206	-580	-185	225	225	3	3
ELS Seno de la ola	90	5	250	25	70	3	50/-150	50/-160	-260	-85	154	154	3	3

Paredes interiores														
	M22 (kN*m/m)		M11 (kN*m/m)		M12 (kN*m/m)		F11 (kN/m)		F22 (kN/m)		V13 (kN/m)		V23 (kN/m)	
	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2
ELS Cresta de la ola	100	0.4	18	1.4	97	2	50/-625	0/-490	-1075	-280	2.8	2.8	65	1.7
ELS Seno de la ola	80	0.5	3	3	60	2	140/-400	70/-358	-1100	-280	1.8	1.8	60	0.4



### 3.8. Resultados modelo celdas circulares optimizadas

Una vez creados los modelos, introducidas las cargas y las combinaciones se procede a correr los modelos y a obtener los resultados del modelo con celdas circulares optimizadas. Como se ha comprobado anteriormente que las combinaciones peores son las asociadas a la Cresta de la Ola y al Seno de la Ola no es necesario obtener los resultados de las combinaciones Flotación y Fondeo. Solo se muestran los resultados de las combinaciones ELU Cresta de la ola y ELS Cresta de la ola, el resto de resultados se encuentran en el anejo.

#### 3.8.1. ELU

##### *Paredes exteriores*

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje horizontal

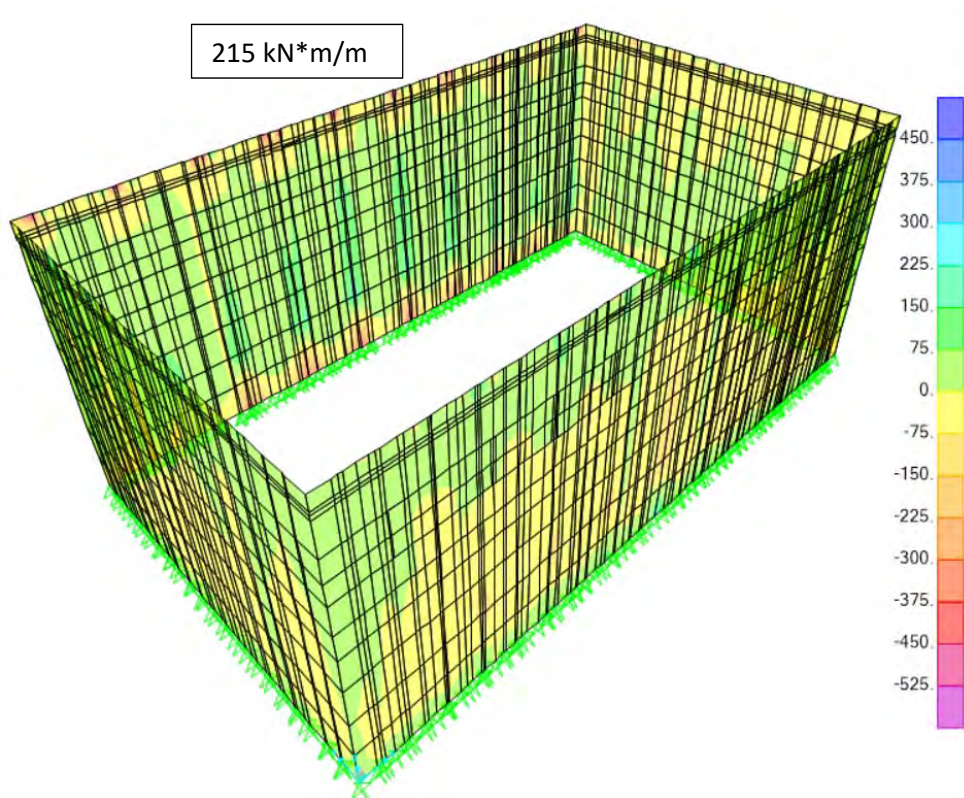


Figura 107 – M22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje vertical:

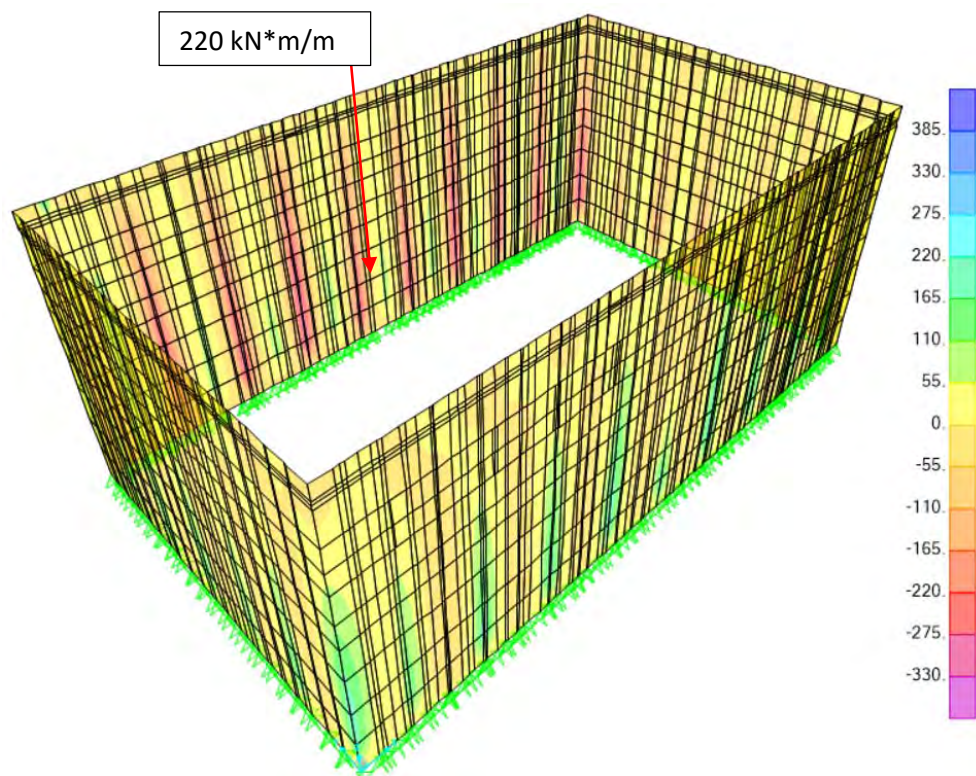


Figura 108 – M11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento torsor M12:

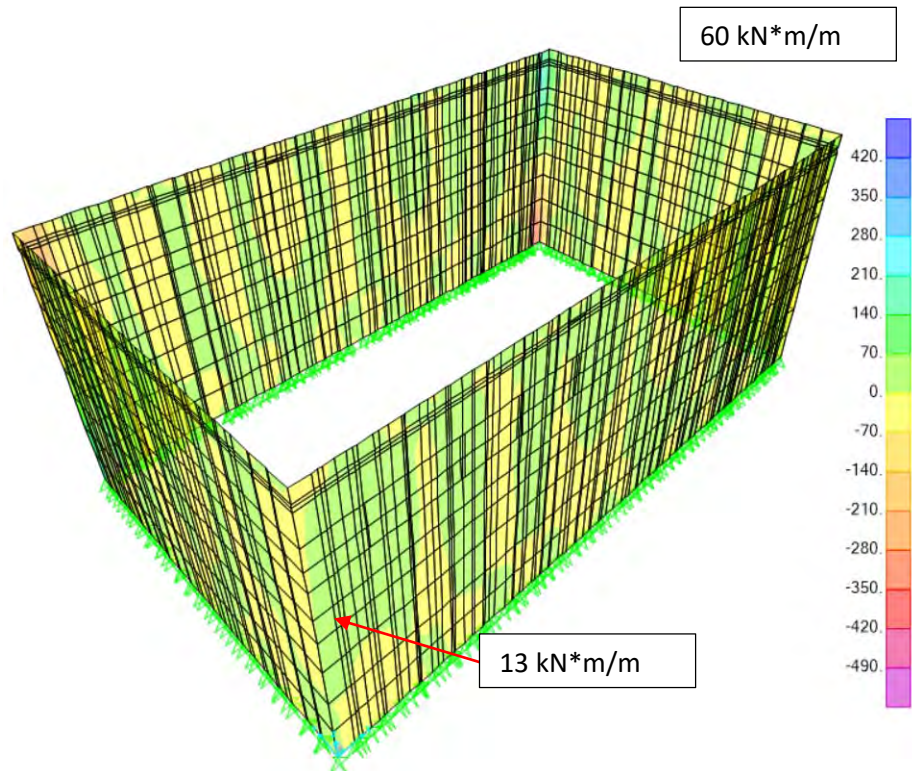


Figura 109 – M12 ELU Cresta de la ola



Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje horizontal:

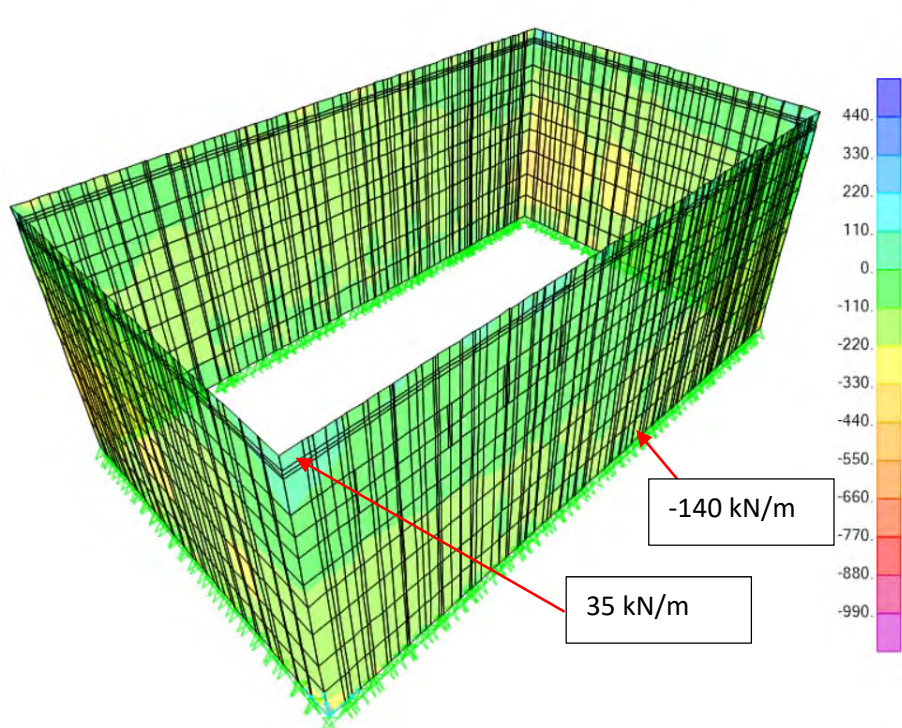


Figura 110 – F11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje vertical:

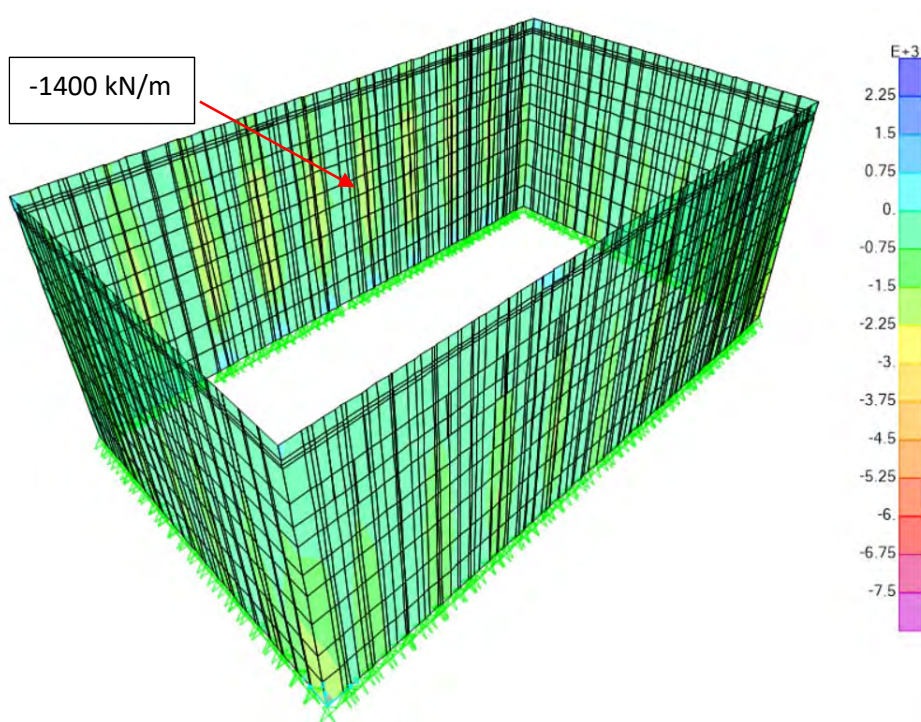


Figura 111 – F22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V13:

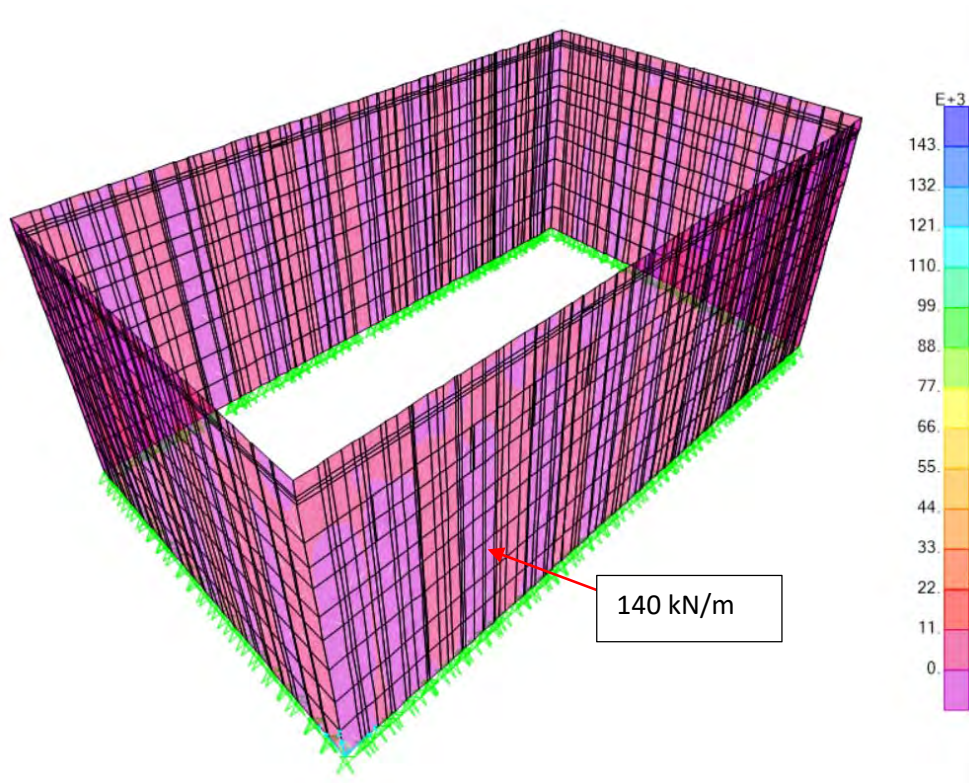


Figura 112 – V13 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V23:

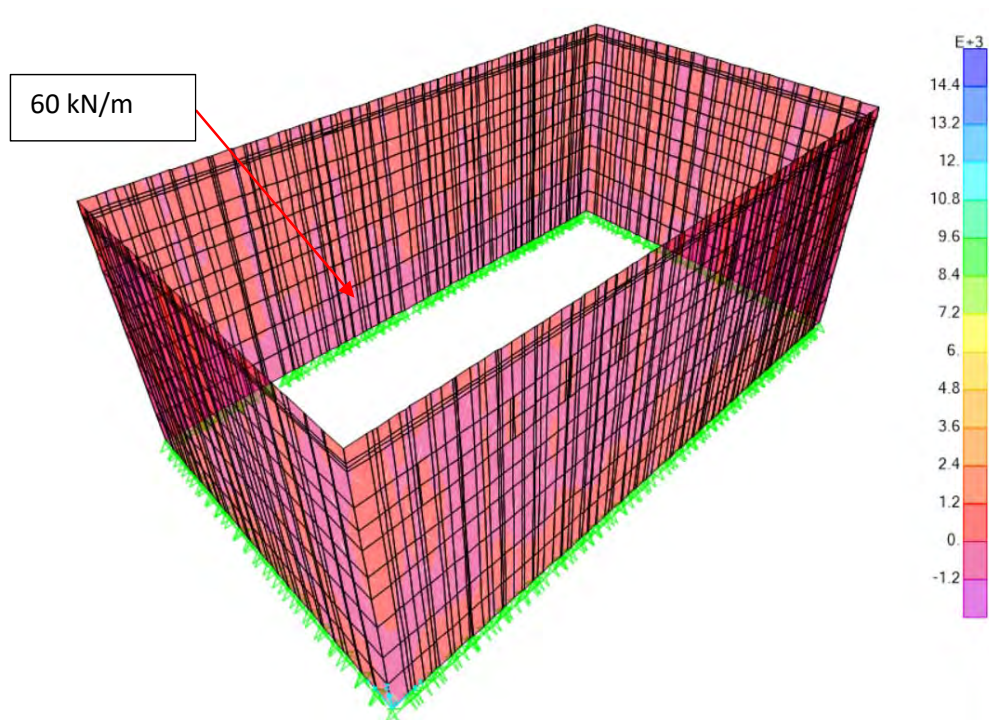


Figura 113 – V23 ELU Cresta de la ola



### Paredes interiores

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje horizontal:

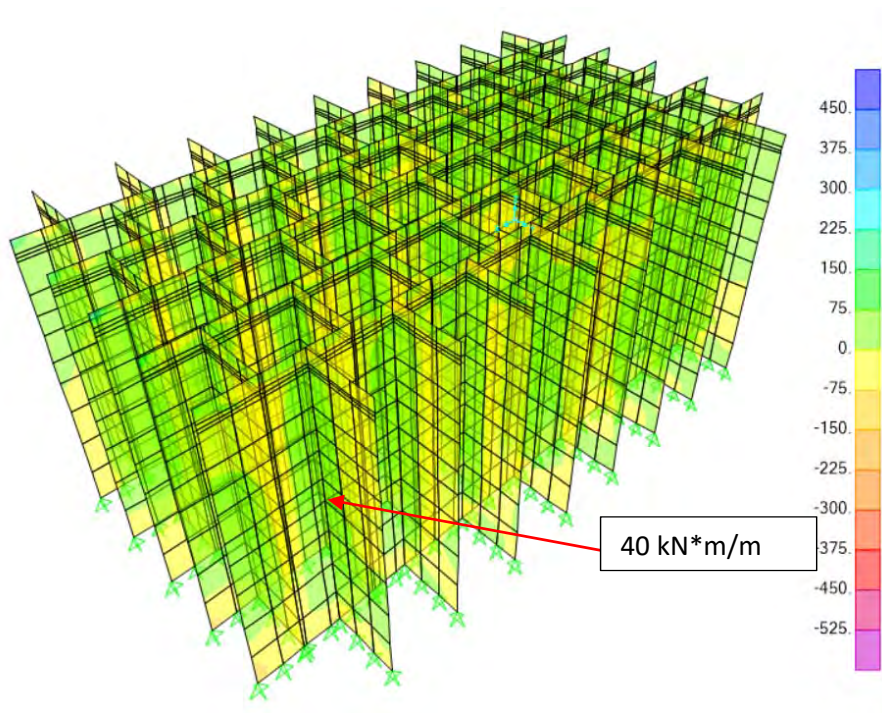


Figura 114 – M22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje vertical:

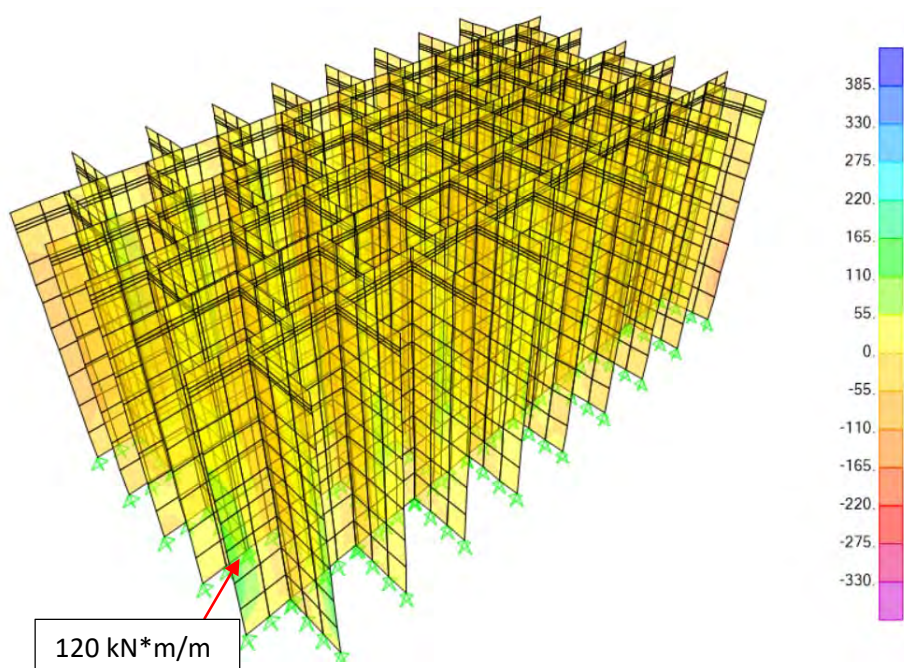


Figura 115 – M11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento torsor M12:

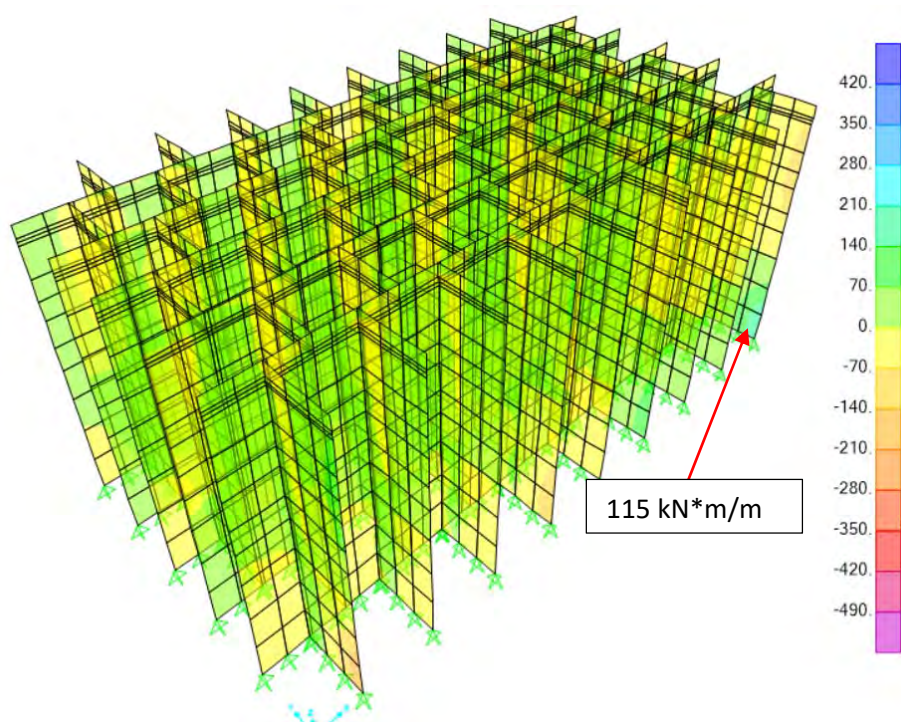


Figura 116 – M12 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje horizontal:

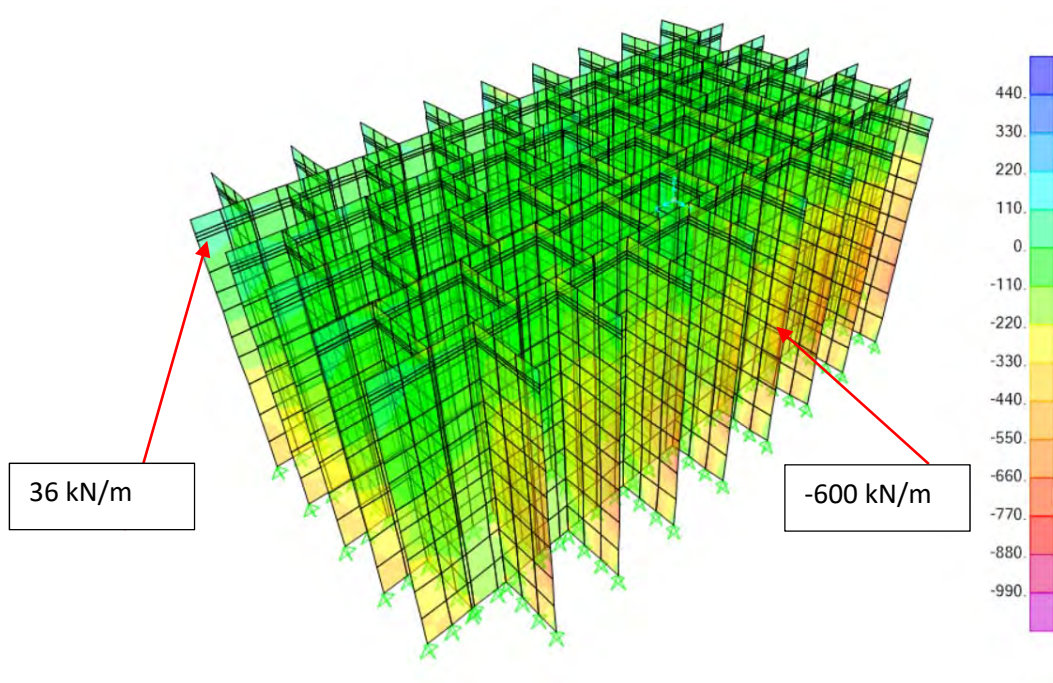


Figura 117 – F11 ELU Cresta de la ola



Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje vertical:

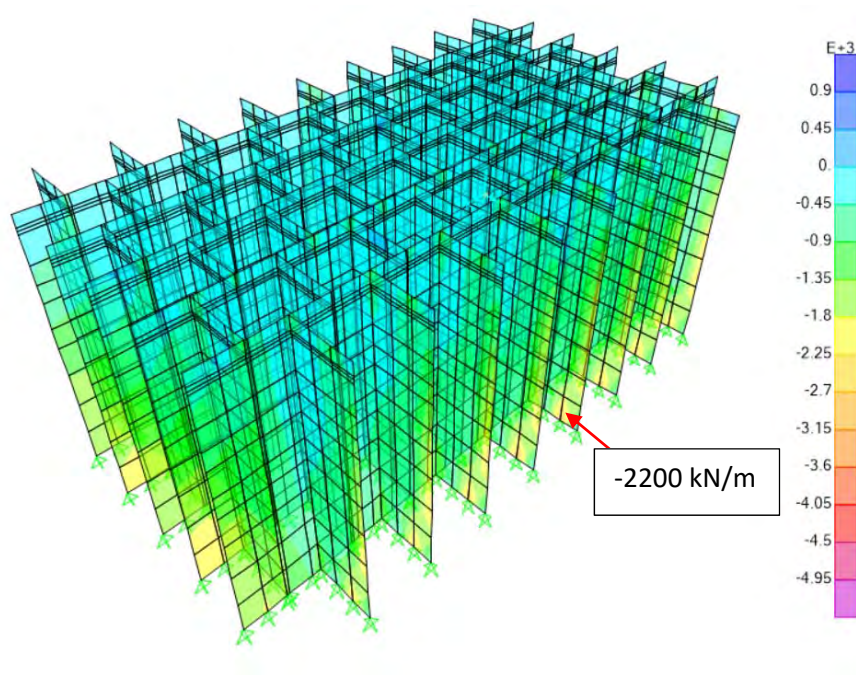


Figura 118 – F22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del cortante V13:

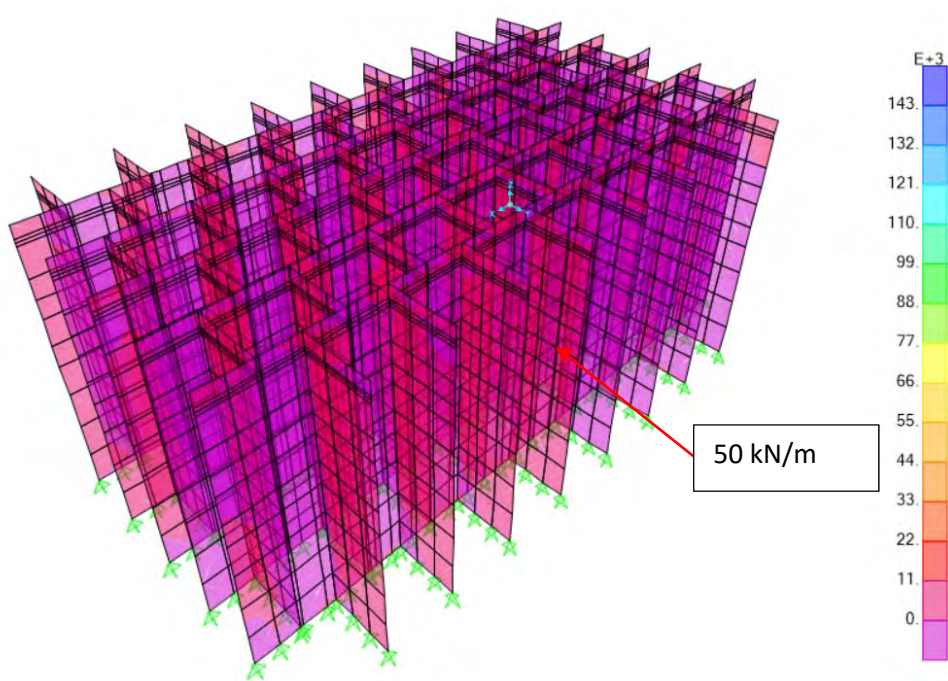


Figura 119 – V13 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del cortante V23:

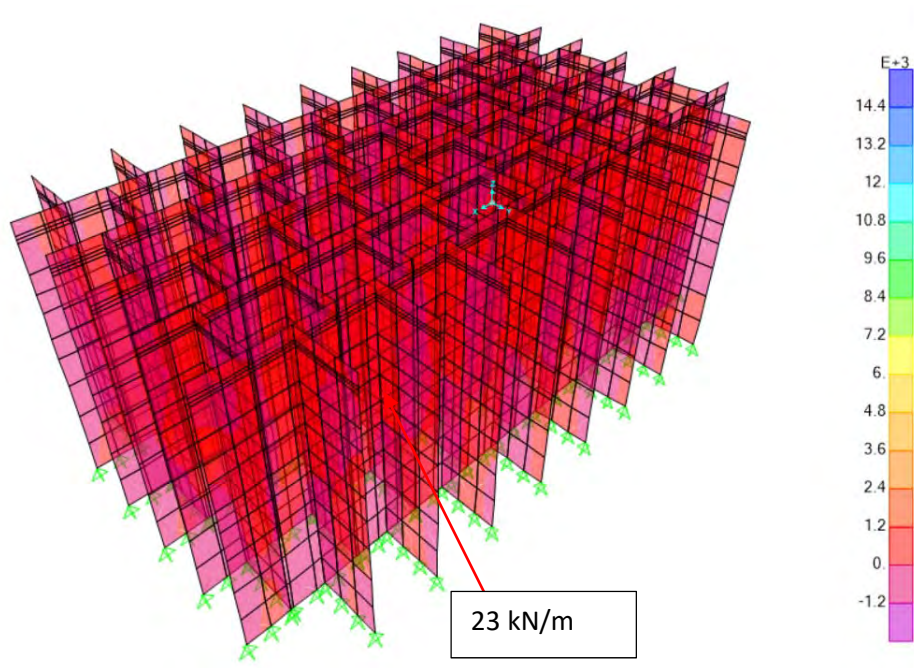


Figura 120 – V23 ELU Cresta de la ola

Resumen ELU celdas circulares optimizadas

Paredes exteriores							
	M22 (kN*m/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	F11 (kN/m)	F22 (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)
ELU Cresta de la ola	215	220	13	35/-140	-1400	140	60
ELU Seno de la ola	130	160	60	80/-200	-1700	200	60

Paredes interiores							
	M22 (kN*m/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	F11 (kN/m)	F22 (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)
ELU Cresta de la ola	40	120	115	36/-600	-2200	50	23
ELU Seno de la ola	22	120	170	200/-450	-2500	25	12



### 3.8.2. ELS

#### Paredes exteriores

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje horizontal:

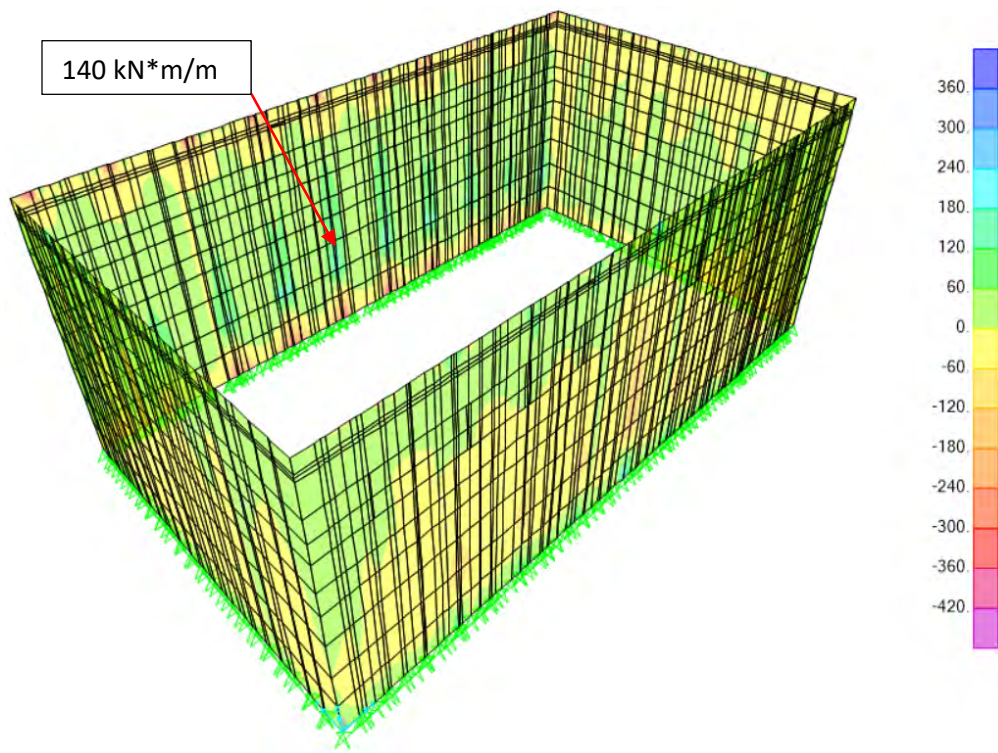


Figura 121 – M22 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje vertical:

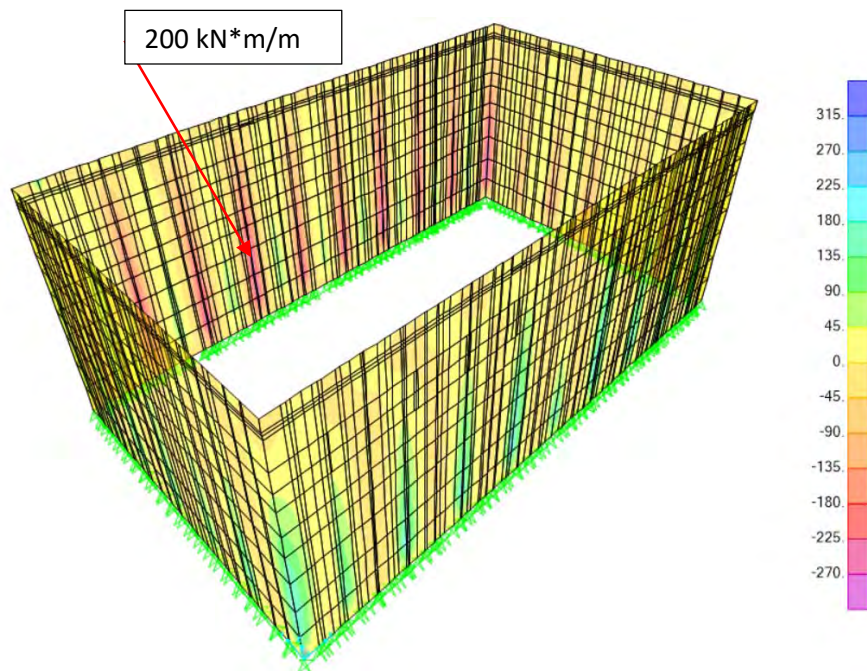


Figura 122 – M11 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento torsor M12:

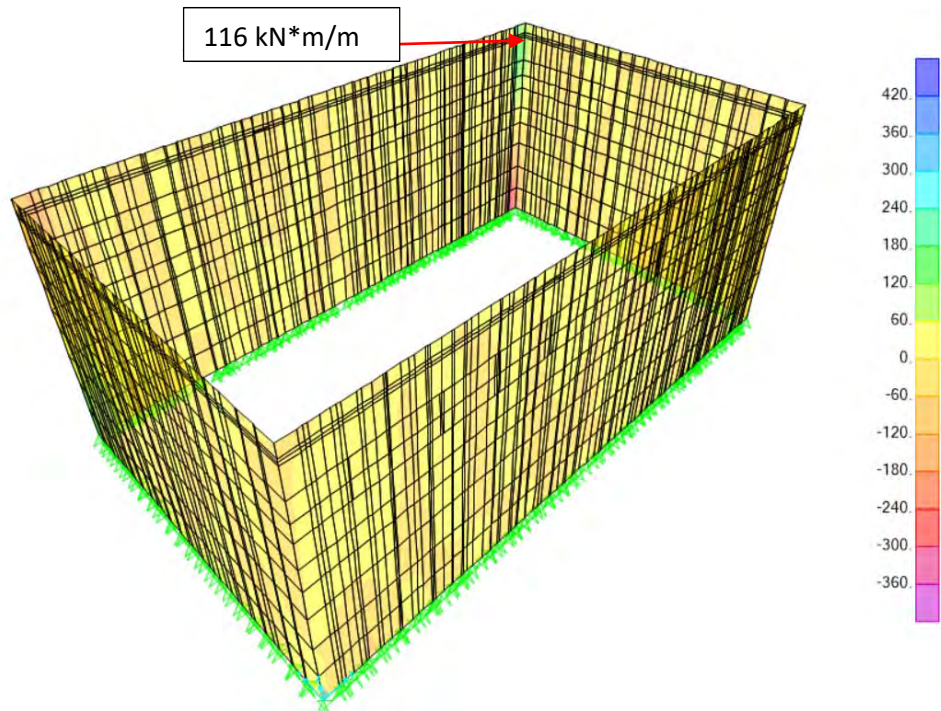


Figura 123 – M12 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje horizontal:

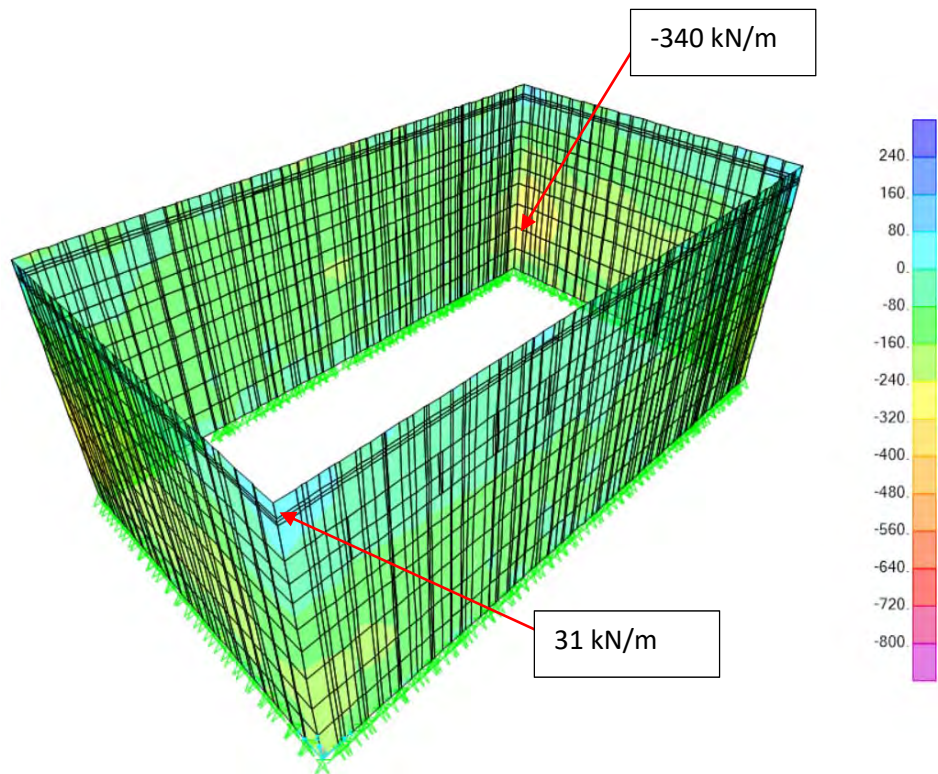


Figura 124 – F11 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje vertical:

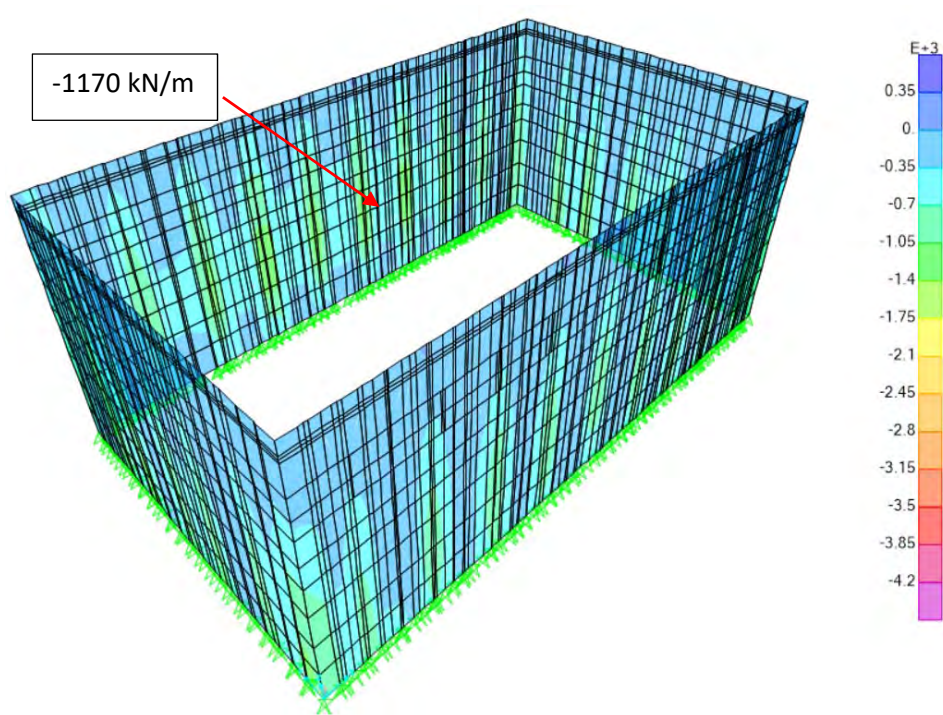


Figura 125 – F22 ELS Cresta de la ola

#### 1.1.1. Paredes interiores

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje horizontal:

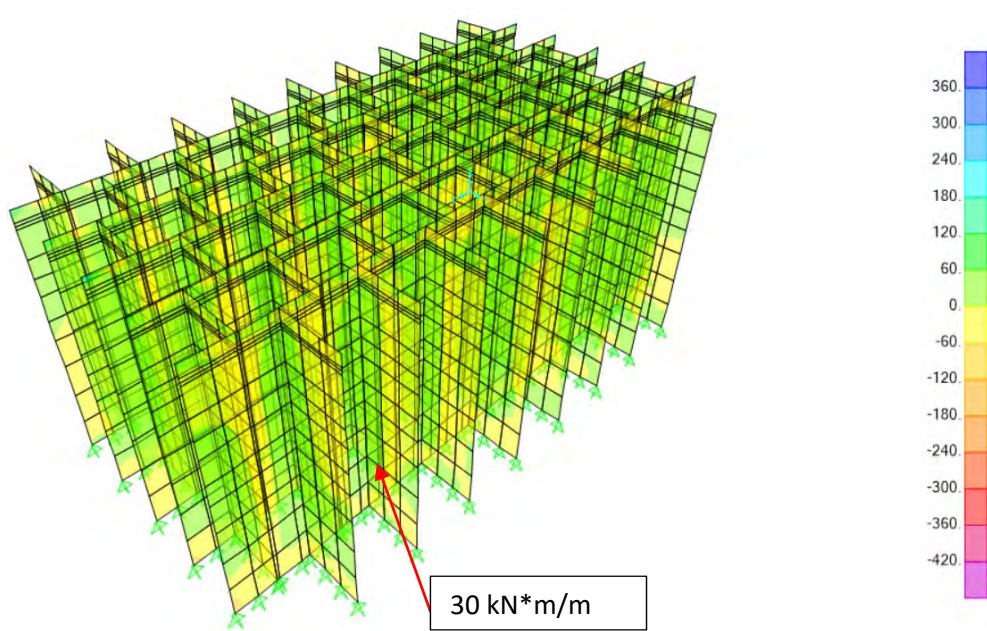


Figura 126 – M22 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje vertical:

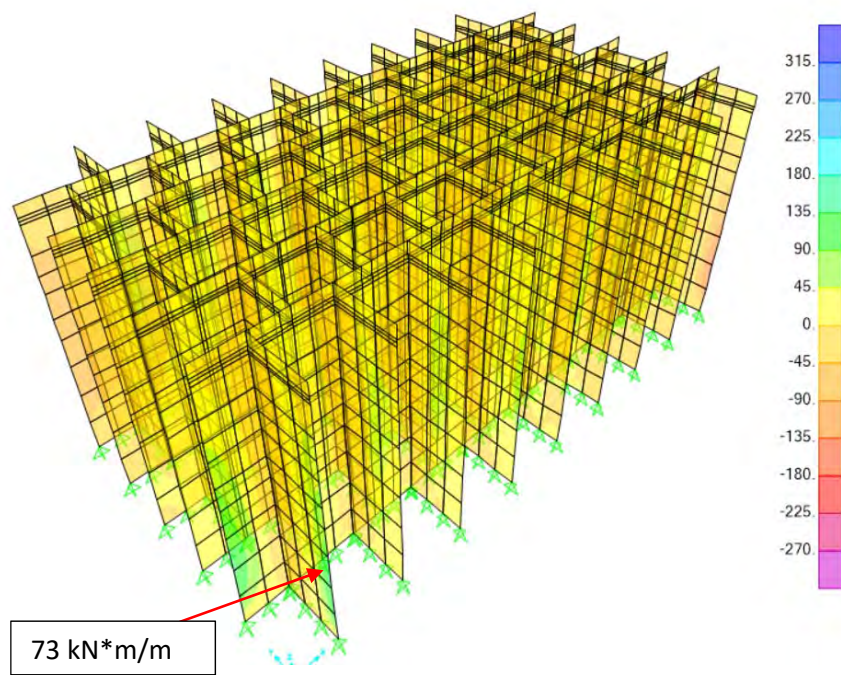


Figura 127 – M11 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento torsor M12:

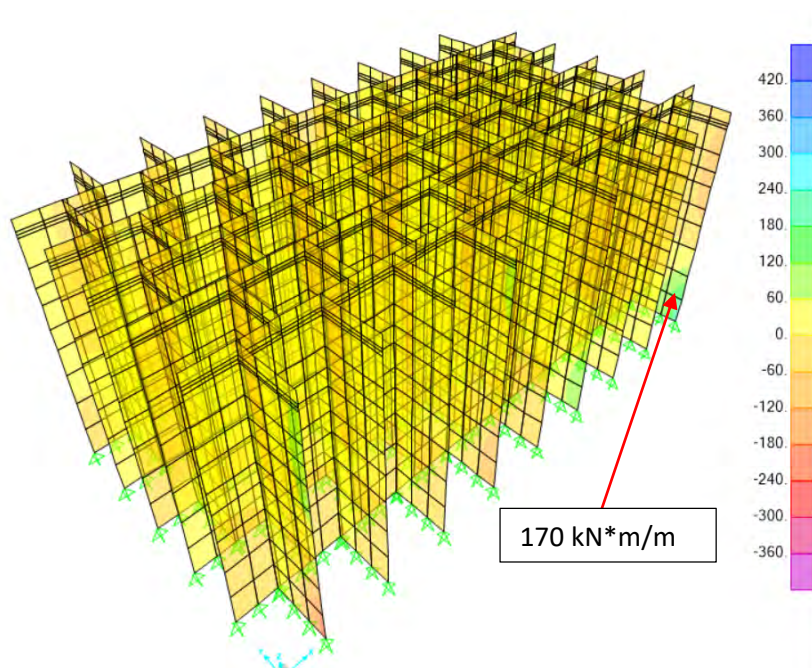


Figura 128 – M12 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje horizontal:

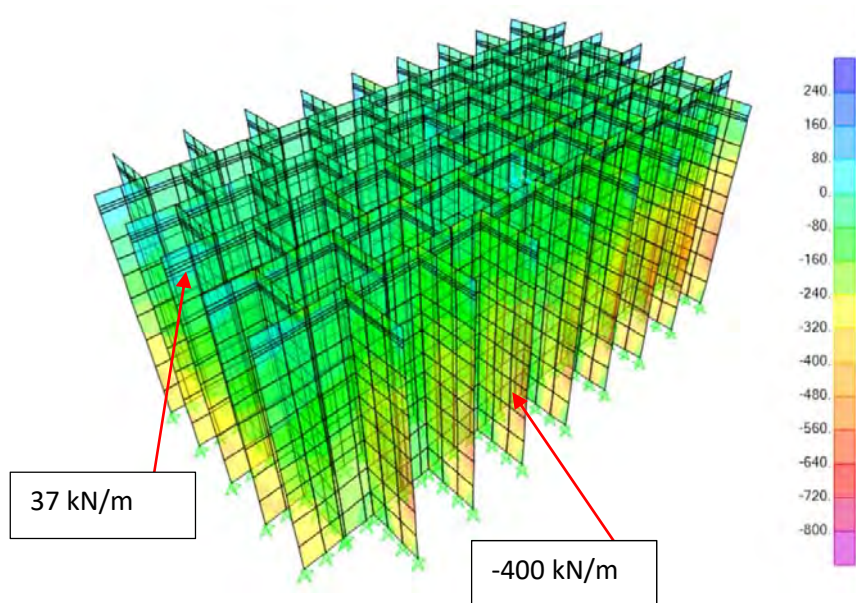


Figura 129 – F11 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje vertical:

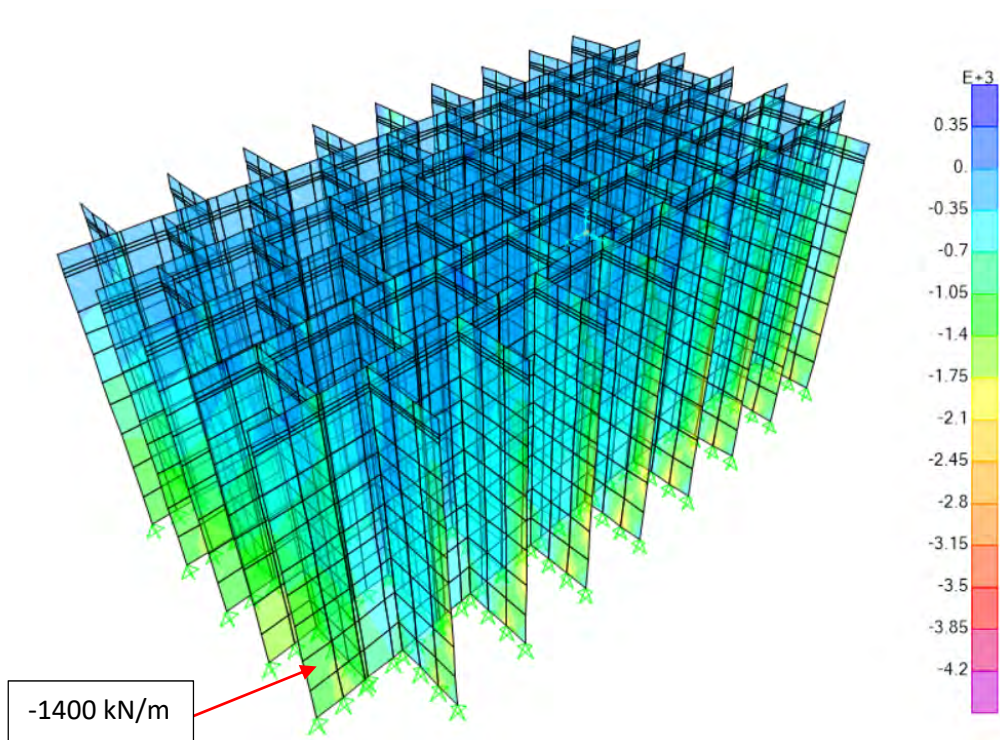


Figura 130 – F22 ELS Cresta de la ola

## 1.1.2. Resumen ELS celdas circulares optimizadas

Paredes exteriores					
	M22 (kN*m/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	F11 (kN/m)	F22 (kN/m)
ELS Cresta de la ola	70	200	116	31/-340	-1170
ELS Seno de la ola	140	130	38	50/-200	-1200

Paredes interiores					
	M22 (kN*m/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	F11 (kN/m)	F22 (kN/m)
ELS Cresta de la ola	30	73	170	37/-400	-14007
ELS Seno de la ola	30	68	121	130/-357	-1960

## 3.9. Dimensionamiento en ELU

El dimensionamiento se realiza siguiendo las indicaciones del Model Code 2010 para el dimensionamiento del hormigón con fibras utilizando el diagrama rectangular. Se calcula el momento último y el factor de seguridad de una sección a partir de la geometría de la sección, las solicitaciones de la sección y las características del hormigón con fibras utilizado. También permite calcular el ancho de fisura para el hormigón con fibras a partir de sus solicitaciones en servicio en presencia de armadura pasiva, según Model Code 2010.

Se dimensiona inicialmente para la sección original con hormigón con fibras de acero con cuantías de 30, 40 y 50 kg/m<sup>3</sup>. Para dichas cuantías se debe suponer unos valores de  $F_{R1k}$  y  $F_{R3k}$ , que en este caso se han obtenido de ensayos realizados en el laboratorio de tecnología de estructuras y materiales (LATEM) de la Escuela de Caminos en Barcelona. Se considera un comportamiento en plasticidad pura, ni softening ni hardening.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	$F_{R1k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{R3k}$ (N/mm <sup>2</sup> )
30	4	4
45	6	6
50	8	8

También se considera el uso de fibras plásticas, en este caso con una cuantía de 8.5 kg/m<sup>3</sup> con  $F_{R1k} = 4$  N/mm<sup>2</sup> y  $F_{R3k} = 4$  N/mm<sup>2</sup> según ensayos realizados en el laboratorio de tecnología de estructuras y materiales de la Escuela de Caminos de Barcelona para dovelas de túnel en Perú. Este es el máximo que se alcanza con fibras plásticas ya que a mayor cuantía se satura y no



producen mejoras en el comportamiento mecánico del hormigón. Como  $F_{R1k}$  y  $F_{R3k}$  para 8.5 kg/m<sup>3</sup> de fibras plásticas coincide con los de fibras metálicas con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> solo se realiza el dimensionamiento para las fibras metálicas y los resultados que se obtengan son válidos también para las fibras plásticas.

En un caso real es preciso determinar los valores de  $F_{R1k}$  y  $F_{R3k}$  de forma experimental a partir de ensayos de flexotracción con el hormigón y las fibras escogidas, pues dependiendo de la dosificación del hormigón y del tipo de fibras (forma, material, etc...) las variaciones en las resistencias post-pico son apreciables.

En el caso que con la sección original no cumpliera se procederá a determinar cuál es el canto mínimo para que se resistan los esfuerzos.

Las secciones se dimensionan para el momento máximo en cada una de las direcciones juntamente con sus axiles concomitantes, el axil de tracción máximo con su momento concomitante, el axil de tracción máximo con el cortante concomitante y el cortante máximo con el axil concomitante.

Para determinar el momento de cálculo en cada dirección se utiliza la formulación de Wood-Armer en *The reinforcement of Slabs in Accordance with a Pre-determined Field of Moments* (Wood, 1968), que incorpora los momentos torsores a los de flexión obtenidos a partir del modelo de elementos finitos.

Así, los momentos de cálculo serán:

$$M_{11d} = M_{11} + |M_{12}|$$

$$M_{22d} = M_{22} + |M_{12}|$$

### 3.9.1. Pared exterior en el cajón con celdas rectangulares

Las paredes exteriores en el cajón con celdas rectangulares tienen un espesor de 0.40 m en el proyecto original con hormigón convencional.

#### M11 máximo

	<b>M11 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M11 máximo</b>	417	8	<b>425</b>	<b>-97</b>

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 0.2, por lo que se procede a aumentar la sección para que cumpla con la normativa. Con este hormigón se necesita un canto de 1.00 m para obtener un factor de seguridad mayor a 1.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 0.3, por lo que se procede a aumentar la sección para que cumpla con la normativa. Con este hormigón se necesita un canto de 0.85 m para obtener un factor de seguridad mayor a 1.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 0.3, por lo que se procede a aumentar la sección para que cumpla con la normativa. Con este hormigón se necesita un canto de 0.75 m para obtener un factor de seguridad mayor a 1.

Estos resultados se resumen en la siguiente tabla

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	0.2
	1.00	1.1
45	0.40	0.3
	0.85	1.2
50	0.40	0.4
	0.75	1.2

Tabla 3-1 Dimensionamiento frente a M11 pared exterior cajón con celdas rectangulares

#### M22 máximo

	M22 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M22 máximo</b>	298	7	305	-360

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 0.4, por lo que se procede a aumentar la sección para que cumpla con la normativa. Con este hormigón se necesita un canto de 0.70 m para obtener un factor de seguridad mayor a 1.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 0.6, por lo que se procede a aumentar la sección para que cumpla con la normativa. Con este hormigón se necesita un canto de 0.60 m para obtener un factor de seguridad mayor a 1.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 0.6, por lo que se procede a aumentar la sección para que cumpla con la normativa. Con este hormigón se necesita un canto de 0.55 m para obtener un factor de seguridad mayor a 1.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	0.4
	0.70	1.1
45	0.40	0.5
	0.60	1.1
50	0.40	0.4
	0.55	1.1

Tabla 3-2 Dimensionamiento frente a M22 pared exterior cajón con celdas rectangulares

#### Tracción máxima con momento

	N (kN/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)
<b>Tracción máxima</b>	<b>60</b>	14	8	<b>22</b>

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 2.6, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 4.1 por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 5.5, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	2.6
45	0.40	4.1
50	0.40	5.5

Tabla 3-3 - Dimensionamiento frente a tracción máxima pared exterior cajón con celdas rectangulares

#### Cortante máximo

	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)	V (kN/m)	N (kN/m)
<b>Cortante máximo</b>	270	110	<b>291.55</b>	<b>-123</b>

Con el espesor original de 0.4 metros no cumple por cortante sin armadura ya que el cortante máximo que resiste sin armadura es de 257 kN/m. Para que cumpla se debe añadir armadura o aumentar el espesor a 0.5 metros

#### Tracción máxima con cortante

	N (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)	V (kN/m)
<b>Tracción máxima con cortante</b>	<b>60</b>	4	7.2	<b>8.24</b>

Con el espesor original de 0.4 metros cumple a cortante sin la necesidad de armadura, el cortante máximo que resiste sin armadura es de 233 kN/m.

#### 3.9.2. Pared interior en el cajón con celdas rectangulares

Las paredes interiores en el cajón con celdas rectangulares tienen un espesor de 0.25 m en el proyecto original con hormigón convencional.

M11 máximo

	<b>M11 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M11 máximo</b>	10	0.5	10.5	-500

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 7.4, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 8.4, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 9.3, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	7.4
45	0.40	8.4
50	0.40	9.3

Tabla 3-4 Dimensionamiento frente a M11 pared interior cajón con celdas rectangulares

M22 máximo

	<b>M22 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M22 máximo</b>	4	0.5	4.5	-410

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 15.4, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 17.7, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 20, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	15.4
45	0.40	17.7
50	0.40	20

Tabla 3-5 Dimensionamiento frente a M22 pared interior cajón con celdas rectangulares



#### Tracción máxima con momento

	N (kN/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)
<b>Tracción máxima</b>	<b>140</b>	0.3	0.1	<b>0.4</b>

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 25.3, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 58.2, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 89.8, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	25.3
45	0.40	58.2
50	0.40	89.8

Tabla 3-6 - Dimensionamiento frente a tracción máxima pared interior cajón con celdas rectangulares

#### Cortante máximo

	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)	V (kN/m)	N (kN/m)
<b>Cortante máximo</b>	35	2	<b>35.06</b>	<b>35</b>

Con el espesor original de 0.25 metros cumple a cortante sin la necesidad de armadura, el cortante máximo que resiste sin armadura es de 172 kN/m.

#### Tracción máxima con cortante

	N (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)	V (kN/m)
<b>Tracción máxima con cortante</b>	<b>140</b>	0.03	0.08	<b>0.085</b>

Con el espesor original de 0.25 metros cumple a cortante sin la necesidad de armadura, el cortante máximo que resiste sin armadura es de 151 kN/m.

#### 3.9.3. Pared exterior con espesor e1 en el cajón con celdas circulares

Las paredes exteriores tienen un espesor de 1.6 m en el proyecto original con hormigón convencional.

#### M11 máximo

	<b>M11 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M11 máximo</b>	440	1	<b>441</b>	<b>-116</b>

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 2.7, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 3.8, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 4.9, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	2.7
45	0.40	3.8
50	0.40	4.9

Tabla 3-7 Dimensionamiento frente a M11 pared exterior e1 cajón con celdas circulares

#### M22 máximo

	<b>M22 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M22 máximo</b>	160	2	<b>162</b>	<b>-140</b>

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 7.4, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 10.5, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 13.5, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	7.4
45	0.40	10.5
50	0.40	13.5

Tabla 3-8 Dimensionamiento frente a M22 pared exterior e1 cajón con celdas circulares

#### Tracción máxima con momento

	<b>N (kN/m)</b>	<b>M11 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>
<b>Tracción máxima</b>	65	20	60	<b>80</b>

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 13.0, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 19.4, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 25.6, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	13.0
45	0.40	19.4
50	0.40	25.6

Tabla 3-9 - Dimensionamiento frente a tracción máxima pared exterior e1 cajón con celdas circulares

#### Cortante máximo

	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)	V (kN/m)	N (kN/m)
<b>Cortante máximo</b>	260	10	260.19	-555

Con el espesor original de 1.6 metros cumple a cortante sin la necesidad de armadura, el cortante máximo que resiste sin armadura es de 807 kN/m.

#### Tracción máxima con cortante

	N	V13	V23	V
<b>Tracción máxima con cortante</b>	65	10	40	41.23

Con el espesor original de 1.6 metros cumple a cortante sin la necesidad de armadura, el cortante máximo que resiste sin armadura es de 717 kN/m.

#### 3.9.4. Pared exterior con espesor e2 en el cajón con celdas circulares

Las paredes exteriores tienen un espesor de 0.40 m en el proyecto original con hormigón convencional.

#### M11 máximo

	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M11 máximo</b>	40	0.9	40.9	-100

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 2.2, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 3.1, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 3.8, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	2.2
45	0.40	3.0
50	0.40	3.8

Tabla 3-10 Dimensionamiento frente a M11 pared exterior e2 cajón con celdas circulares

#### M22 máximo

	M22 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M22 máximo</b>	8	0.1	8.1	-160

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 12.4, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 16.4, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 20.2, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	12.4
45	0.40	16.4
50	0.40	20.2

Tabla 3-11 Dimensionamiento frente a M11 pared exterior e2 cajón con celdas circulares

#### Tracción máxima con momento

	N (kN/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)
<b>Tracción máxima</b>	30	4	0.2	4.2

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 15.7, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 23.7, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 31.4, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.



Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	15.7
45	0.40	23.7
50	0.40	31.4

Tabla 3-12 Dimensionamiento frente tracción máxima pared exterior e2 cajón con celdas circulares

#### Cortante máximo

	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)	V (kN/m)	N (kN/m)
<b>Cortante máximo</b>	30	3	30.15	-280

Con el espesor original de 0.40 metros cumple a cortante sin la necesidad de armadura, el cortante máximo que resiste sin armadura es de 282 kN/m.

#### Tracción máxima con cortante

	N (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)	V (kN/m)
<b>Tracción máxima con cortante</b>	30	12	2	12.17

Con el espesor original de 0.40 metros cumple a cortante sin la necesidad de armadura, el cortante máximo que resiste sin armadura es de 237 kN/m.

#### 3.9.5. Pared interior con espesor e1 en el cajón con celdas circulares

Las paredes interiores tienen un espesor de 2.75 m en el proyecto original con hormigón convencional.

#### M11 máximo

	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M11 máximo</b>	70	18	88	-330

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 41.2, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 58.1, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 74.4, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	41.2
45	0.40	58.1
50	0.40	74.4

Tabla 3-13 Dimensionamiento frente a M11 pared interior e1 cajón con celdas circulares

#### M22 máximo

	M22 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M22 máximo</b>	240	7	<b>247</b>	<b>-370</b>

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 14.9, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 20.9, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 26.7, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	14.9
45	0.40	20.9
50	0.40	26.7

Tabla 3-14 Dimensionamiento frente a M22 pared interior e1 cajón con celdas circulares

#### Tracción máxima con momento

	N (kN/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)
<b>Tracción máxima</b>	<b>190</b>	11	5.2	<b>16.2</b>

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 183.8, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 277.4, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 367.1, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	183.8
45	0.40	277.4
50	0.40	367.1

Tabla 3-15 Dimensionamiento frente a tracción máxima pared interior e1 cajón con celdas circulares

#### Cortante máximo

	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)	V (kN/m)	N (kN/m)
<b>Cortante máximo</b>	100	20	<b>101.98</b>	<b>-294</b>

Con el espesor de 2.75 metros cumple a cortante sin la necesidad de armadura, el cortante máximo que resiste sin armadura es de 1189 kN/m.

#### Tracción máxima con cortante

	N (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)	V (kN/m)
<b>Tracción máxima con cortante</b>	<b>190</b>	0.7	7.5	<b>7.53</b>

Con el espesor de 2.75 metros cumple a cortante sin la necesidad de armadura, el cortante máximo que resiste sin armadura es de 1118 kN/m.

#### 3.9.6. Pared interior con espesor e2 en el cajón con celdas circulares

Las paredes interiores tienen un espesor de 0.35 cm en el proyecto original con hormigón convencional.

#### M11 máximo

	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M11 máximo</b>	2.8	0.1	<b>2.9</b>	<b>-300</b>

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 33.8, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 41.5, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 48.8, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	33.8
45	0.40	41.5
50	0.40	48.8

Tabla 3-16 Dimensionamiento frente a M11 pared interior e2 cajón con celdas circulares

### M22 máximo

	<b>M22 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M22 máximo</b>	3	0.2	3.2	-230

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 27.4, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 34.5, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 41.3, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	27.4
45	0.40	34.5
50	0.40	41.3

Tabla 3-17 Dimensionamiento frente a M22 pared interior e2 cajón con celdas circulares

### Tracción máxima con momento

	<b>N (kN/m)</b>	<b>M11 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>
<b>Tracción máxima</b>	150	0.15	0.02	0.17

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 162.2, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 312, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> y el espesor original el factor de seguridad obtenido es de 455.6, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Cuantía (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Factor de seguridad
30	0.40	162.2
45	0.40	312
50	0.40	455.6

Tabla 3-18 Dimensionamiento frente a tracción máxima pared interior e2 cajón con celdas circulares

### Cortante máximo

	<b>V13 (kN/m)</b>	<b>V23 (kN/m)</b>	<b>V (kN/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>Cortante máximo</b>	4	14	14.56	-158



Con el espesor original de 0.35 metros cumple a cortante sin la necesidad de armadura, el cortante máximo que resiste sin armadura es de 238 kN/m.

Tracción máxima con cortante

	N (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)	V (kN/m)
<b>Tracción máxima con cortante</b>	<b>150</b>	<b>1</b>	<b>0.01</b>	<b>1.00</b>

Con el espesor original de 0.35 metros cumple a cortante sin la necesidad de armadura, el cortante máximo que resiste sin armadura es de 198 kN/m.

3.9.7. Pared exterior en el cajón con celdas circulares optimizadas

Las paredes exteriores en el cajón con celdas rectangulares tienen un espesor de 1.6 m.

M11 máximo

	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M11 máximo</b>	<b>220</b>	<b>3</b>	<b>223</b>	<b>-900</b>

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> el factor de seguridad obtenido es de 7.7, con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> el factor de seguridad obtenido es de 9.9 y con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> el factor de seguridad obtenido es de 12.0, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

M22 máximo

	M22 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M22 maximo</b>	<b>215</b>	<b>2.18</b>	<b>217.18</b>	<b>-517</b>

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de 30 kg/m<sup>3</sup> el factor de seguridad obtenido es de 6.7, con una cuantía de 45 kg/m<sup>3</sup> el factor de seguridad obtenido es de 9.0 y con una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup> el factor de seguridad obtenido es de 11.2, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

Tracción máxima con momento

	N (kN/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)
<b>Tracción máxima</b>	<b>80</b>	<b>15.7</b>	<b>8</b>	<b>23.7</b>

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de  $30 \text{ kg/m}^3$  el factor de seguridad obtenido es de 43.5, con una cuantía de  $45 \text{ kg/m}^3$  el factor de seguridad obtenido es de 65.1 y con una cuantía de  $50 \text{ kg/m}^3$  el factor de seguridad obtenido es de 85.8, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

#### Cortante máximo

	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)	V (kN/m)	N (kN/m)
<b>Cortante máximo</b>	200	21.7	<b>201.17</b>	<b>65</b>

Con el espesor de 1.6 metros cumple a cortante sin la necesidad de armadura, el cortante máximo que resiste sin armadura es de 717 kN/m.

#### Tracción máxima con cortante

	N (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)	V (kN/m)
<b>Tracción máxima con cortante</b>	<b>80</b>	13	2.2	<b>13.18</b>

Con el espesor de 1.6 metros cumple a cortante sin la necesidad de armadura, el cortante máximo que resiste sin armadura es de 715 kN/m.

### 3.9.8. Pared interior en el cajón con celdas circulares optimizadas

Las paredes interiores en el cajón con celdas rectangulares tienen un espesor de 0.93m.

#### M11 máximo

	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M11 máximo</b>	120	170	<b>290</b>	<b>-265</b>

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de  $30 \text{ kg/m}^3$  el factor de seguridad obtenido es de 1.7, con una cuantía de  $45 \text{ kg/m}^3$  el factor de seguridad obtenido es de 2.2 y con una cuantía de  $50 \text{ kg/m}^3$  el factor de seguridad obtenido es de 2.8, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

#### M22 máximo

	M22 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M22 maximo</b>	40	1.4	<b>41.4</b>	<b>-460</b>

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de  $30 \text{ kg/m}^3$  el factor de seguridad obtenido es de 13.5, con una cuantía de  $45 \text{ kg/m}^3$  el factor de seguridad obtenido es de 17.4 y con una cuantía de  $50 \text{ kg/m}^3$  el factor de seguridad obtenido es de 21.2, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

#### Tracción máxima con momento

	N (kN/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)
<b>Tracción máxima</b>	<b>200</b>	4.3	0.7	<b>5</b>

Con un hormigón con fibras de acero con una cuantía de  $30 \text{ kg/m}^3$  el factor de seguridad obtenido es de 56.4, con una cuantía de  $45 \text{ kg/m}^3$  el factor de seguridad obtenido es de 91.6 y con una cuantía de  $50 \text{ kg/m}^3$  el factor de seguridad obtenido es de 125.3, por lo que se cumplen los requisitos mínimos.

#### Cortante máximo

	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)	V (kN/m)	N (kN/m)
<b>Cortante máximo</b>	50	2	<b>50.04</b>	<b>-265</b>

Con el espesor de 0.93 metros cumple a cortante sin la necesidad de armadura, el cortante máximo que resiste sin armadura es de 505 kN/m.

#### Tracción máxima con cortante

	N (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)	V (kN/m)
<b>Tracción máxima con cortante</b>	<b>200</b>	2.4	0.22	<b>2.41</b>

Con el espesor de 1.6 metros cumple a cortante sin la necesidad de armadura, el cortante máximo que resiste sin armadura es de 439 kN/m.

### 3.10. Dimensionamiento en ELS

En ELS se comprueba si se produce la fisuración del hormigón debido a los esfuerzos a los que está sometido, y si se produce se comprueba que sea menor que la marcada en el Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias. El límite marcado en el manual es de 0.20 mm.

### 3.10.1. Pared exterior en el cajón con celdas rectangulares

Las paredes exteriores en el cajón con celdas rectangulares tienen un espesor de 0.40 m en el proyecto original con hormigón convencional.

#### M11 máximo

	<b>M11 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M11 máximo</b>	350	0.2	<b>350.2</b>	<b>-96</b>

Se produce fisuración, pero si se aumenta el canto hasta 0.75 sí que se cumple el límite.

#### M22 máximo

	<b>M22 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M22 máximo</b>	260	0.33	<b>260.33</b>	<b>-353</b>

Se produce fisuración, pero si se aumenta el canto hasta 0.75 sí que se cumple el límite.

#### Tracción máxima con momento

	<b>N (kN/m)</b>	<b>M11 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>
<b>Tracción máxima</b>	<b>37</b>	6	2	<b>8</b>

No se produce fisuración.

### 3.10.2. Pared interior en el cajón con celdas rectangulares

Las paredes interiores en el cajón con celdas rectangulares tienen un espesor de 0.25 m en el proyecto original con hormigón convencional.

#### M11 máximo

	<b>M11 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M11 máximo</b>	5	0.04	<b>5.04</b>	<b>-500</b>



No se produce fisuración.

M22 máximo

	<b>M22 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M22 máximo</b>	2.5	0.2	2.7	-74

No se produce fisuración.

Tracción máxima con momento

	<b>N (kN/m)</b>	<b>M11 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>
<b>Tracción máxima</b>	85	0.1	0.07	0.17

No se produce fisuración.

### 3.10.3. Pared exterior con espesor e1 en el cajón con celdas circulares

Las paredes exteriores tienen un espesor de 1.6 m en el proyecto original con hormigón convencional.

M11 máximo

	<b>M11 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M11 máximo</b>	290	0.2	290.2	-690

No se produce fisuración.

M22 máximo

	<b>M22 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M22 máximo</b>	120	2	122	-90

No se produce fisuración.

Tracción máxima con momento

	N (kN/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)
<b>Tracción máxima</b>	<b>50</b>	13	34	<b>47</b>

No se produce fisuración.

3.10.4. Pared exterior con espesor e2 en el cajón con celdas circulares

Las paredes exteriores tienen un espesor de 0.40 m en el proyecto original con hormigón convencional.

M11 máximo

	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M11 máximo</b>	35	0.04	<b>35.04</b>	<b>-90</b>

No se produce fisuración.

M22 máximo

	M22 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M22 máximo</b>	22	0.05	<b>22.05</b>	<b>-171</b>

No se produce fisuración.

Tracción máxima con momento

	N (kN/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)
<b>Tracción máxima</b>	<b>50</b>	3.5	0.24	<b>3.74</b>

No se produce fisuración.

3.10.5. Pared interior con espesor e1 en el cajón con celdas circulares

Las paredes interiores tienen un espesor de 1.6 m en el proyecto original con hormigón convencional.

M11 máximo

	<b>M11 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M11 máximo</b>	18	2	20	-170

No se produce fisuración.

M22 máximo

	<b>M22 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M22 máximo</b>	100	16	116	-350

No se produce fisuración.

Tracción máxima con momento

	<b>N (kN/m)</b>	<b>M11 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>
<b>Tracción máxima</b>	140	1	0.3	1.3

No se produce fisuración.

### 3.10.6. Pared interior con espesor e2 en el cajón con celdas circulares

Las paredes interiores tienen un espesor de 0.40 m en el proyecto original con hormigón convencional.

M11 máximo

	<b>M11 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M11 máximo</b>	3	0.002	3.002	-250

No se produce fisuración.

M22 máximo

	<b>M22 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M22 máximo</b>	0.5	0.09	0.59	-145

No se produce fisuración.

Tracción máxima con momento

	N (kN/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)
<b>Tracción máxima</b>	<b>70</b>	0.03	0.07	<b>0.1</b>

No se produce fisuración.

3.10.7. Pared exterior en el cajón con celdas circulares optimizadas

Las paredes exteriores en el cajón con celdas circulares optimizadas tienen un espesor de 1.6 m

M11 máximo

	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M11 máximo</b>	200	0.5	<b>200.5</b>	<b>-120</b>

No se produce fisuración.

M22 máximo

	M22 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M22 maximo</b>	140	4.4	<b>144.4</b>	<b>-1200</b>

No se produce fisuración.

Tracción máxima con momento

	N (kN/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)
<b>Tracción máxima</b>	<b>50</b>	9	3.3	<b>12.3</b>

No se produce fisuración.



## 3.10.8. Pared interior en el cajón con celdas circulares optimizadas

Las paredes interiores en el cajón con celdas circulares optimizadas tienen un espesor de 0.93 m.

M11 máximo

	<b>M11 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M11 máximo</b>	73	94	167	-197

No se produce fisuración.

M22 máximo

	<b>M22 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>	<b>N (kN/m)</b>
<b>M22 máximo</b>	30	5	35	-1300

No se produce fisuración.

Tracción máxima con momento

	<b>N (kN/m)</b>	<b>M11 (kN*m/m)</b>	<b>M12 (kN*m/m)</b>	<b>M (kN*m/m)</b>
<b>Tracción máxima</b>	130	1	1.4	2.4

No se produce fisuración.

## 3.10.9. Resumen del dimensionamiento

Los cajones con celdas circulares tienen un canto variable debido a la geometría de las celdas, esto proporciona un canto mayor en las uniones entre celdas que es donde se producen las mayores solicitaciones. Este hecho permite que al dimensionarlo con fibras metálicas y plásticas se cumplan todos los estados límites tanto para el cajón con celdas circulares como el cajón con celdas circulares optimizadas.

En cambio en el cajón con celdas rectangulares no se produce apenas ninguna variación del espesor (sólo existen pequeñas cartelas), y ante las solicitaciones debidas principalmente al oleaje y a la presión hidrostática las paredes exteriores no cumplen los criterios de dimensionamiento con el espesor original con ninguna de las dosificaciones de fibras. Para que cumpliera tanto en estado límite último como en servicio se debería aumentar el espesor original de 0.40 metros de la pared exterior a 1.00 metros si se utiliza una dosificación de 30

kg/m<sup>3</sup>, a 0.85 metros si se utiliza una dosificación de 45 kg/m<sup>3</sup> y a 0.75 metros si se utiliza una dosificación de 50 kg/m<sup>3</sup>.

Como estos espesores son muy elevados se decide comprobar si un cajón marítimo que su función fuera de muelle en lugar de dique cumpliría con los requisitos en ELU y en ELS. Esto se plantea porque los momentos en ELU (Figura 131) son debidos principalmente a la presión hidrostática y al efecto de las olas (Figura 132) y en un cajón muelle las olas no afectan al cajón, por lo que estos esfuerzos desaparecerían. En cambio se deberán tener en cuenta los esfuerzos propios de un muelle, que son las sobrecargas por atraque y por los equipos e instalaciones de manipulación de mercancías. Estos últimos se pueden obviar ya que solo introducen una compresión que afecta positivamente al comportamiento del cajón.

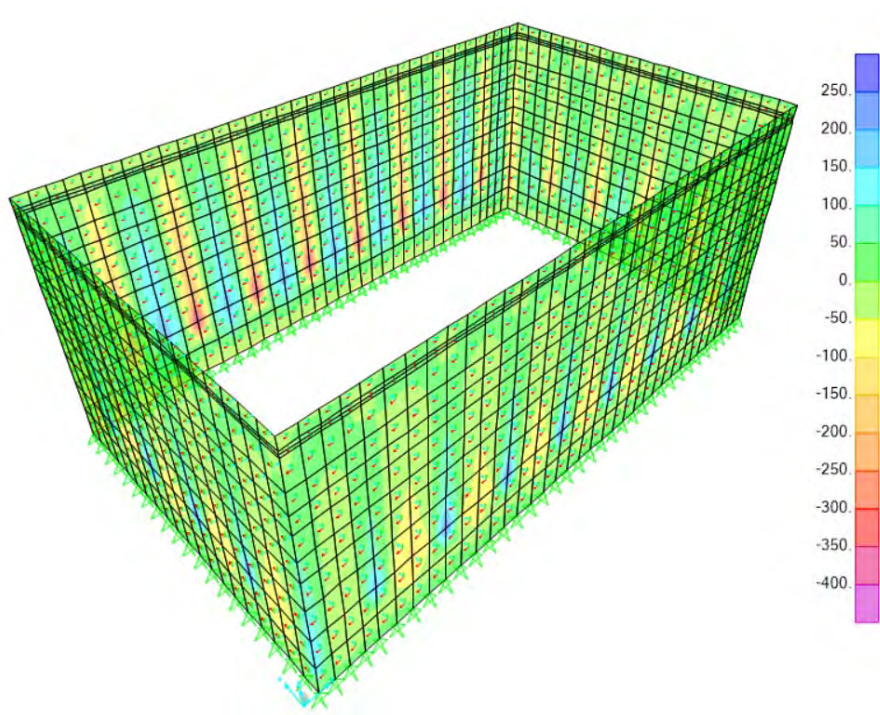


Figura 131 – M11 ELU cresta de la ola, pared exterior del cajón con celdas rectangulares

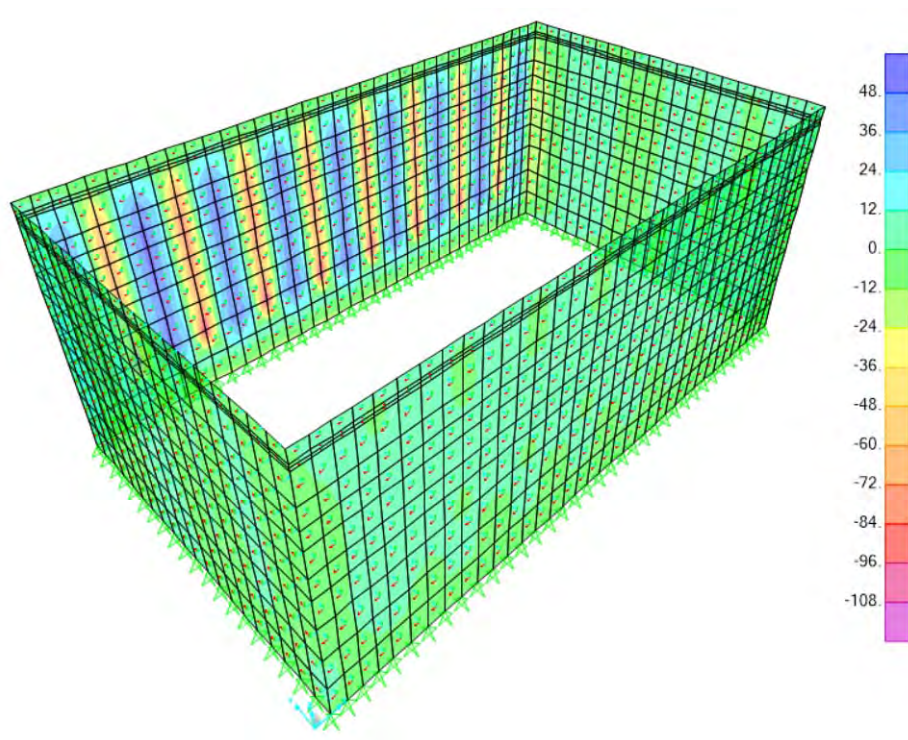


Figura 132 – M11 debido únicamente a la cresta de la ola sin mayorar, pared exterior del cajón con celdas rectangulares

### 3.11. Modelización de un cajón con función de muelle

Como el proyecto de los cajones originales es para un dique no se dispone de información sobre buque tipo, defensas o bolardos, por lo que se busca un cajón similar diseñado como muelle para obtener la información necesaria.

El proyecto disponible que tiene unas dimensiones parecidas es el proyecto de aumento de calado del muelle de Aragón en el puerto de Tarragona. Este proyecto se diseña para un buque de diseño de 57.000 toneladas de peso muerto.

Las cargas a considerar son las cargas de ataque provocadas por el impacto del buque y las cargas de amarre, provocadas por el viento sobre el buque.

#### 3.11.1. Cargas de ataque

Durante el ataque un buque produce un impacto contra el muelle. Este impacto depende de:

- La energía cinética desarrollada por el buque durante el ataque.
- La excentricidad del buque.
- La geometría del buque.
- La configuración geométrica del ataque.
- Las relaciones tensión/deformación en el buque, la estructura resistente y el sistema de defensa.

Las cargas de ataque se calculan siguiendo el punto 3.4.2.3.5. SOBRECARGA DE OPERACIONES DE BUQUES, apartado a<sub>1</sub> de la ROM 0.2-90 (Puertos del Estado, 1990).

Cálculo de las cargas de ataque:

#### *Datos de entrada*

Desplazamiento	$\Delta =$	70.964 [t]
Atraque lateral, velocidad del buque	$V =$	0.08 [m/s]
Velocidad de aproximación del buque	$V_b =$	0.08 [m/s]
Calado del buque de proyecto	$D =$	12.65 [m]
Manga del buque de proyecto	$B =$	33.12 [m]
Eslora del buque de proyecto	$L =$	217 [m]
Eslora entre perpendiculares	$L_{pp} =$	208 [m]
Densidad del agua	$\gamma_w =$	1.03 [t/m <sup>3</sup> ]

#### *Energía cinética desarrollada por el buque*

Coefficiente de masa hidrodinámica	$C_m =$	1.76
Energía cinética desarrollada por el buque durante el atraque	$E =$	40.83 [t*m]

#### *Energía cinética absorbida por el sistema de atraque*

Coefficiente de excentricidad	$C_e =$	0.59
Coefficiente de bloque	$C_b =$	0.82
Radio de giro del buque	$k =$	57.68 [m]
Distancia punto de impacto a G buque	$a =$	54.25 [m]
Ángulo entre v y línea pto impacto- G buque	$\gamma =$	70.00 [°]
Coefficiente geométrico del buque	$C_g =$	1.00
Coefficiente de configuración del atraque	$C_c =$	0.80
Coefficiente de rigidez del sistema de atraque	$C_s =$	1.00

#### *Hipótesis de trabajo*

E <sup>a</sup> cedida en Condiciones Normales de Operación	$E_{f, Norm} =$	19.13 [t*m]
--	-----------------	-------------



$E^a$  cedida en Condiciones Excepcionales

$$E_{f,Excep} = 38.25 \text{ [t*m]}$$

### *Fuerzas de Impacto en el Sistema de Atrache*

Las defensas considerada son: C1400Φ-800 L=3000

Carga de Impacto	<b>R=</b>	<b>117.00 [t]</b>
Energía absorbida en Condiciones Normales	$E^a_{CN} =$	19.13 [t*m]
Carga de Impacto en Condiciones Normales	$R_{CN} =$	84.30 [t]
Deformación de la defensa en Condiciones Normales	$\epsilon_{CN} =$	28.00 [%]
Energía absorbida en Condiciones Excepcionales	$E^a_{CE} =$	38.3 [t*m]
Carga de Impacto en Condiciones Excepcionales	$R_{CE} =$	117.00 [t]
Deformación de la defensa en Condiciones Excepcionales	$\epsilon_{CE} =$	41.50 [%]

### *Distribución de las fuerzas de impacto*

Separación entre defensas	$d_d =$	30.0 [m]
Área de contacto buque-sistema de defensa	$A_c =$	4.20 [m <sup>2</sup> ]
Presión de contacto en el casco del buque	$\sigma =$	27.86 [t/m <sup>2</sup> ]

Esta carga se transmite al muelle mediante las defensas. En este caso se consideran defensas C1400Φ-800 que tienen una longitud de 3 metros y se sitúan con una separación entre ellas de 30 metros.

Un buque de 217 metros de eslora se apoya contra 7 defensas si estas están situadas cada 30 metros, con una presión de contacto de 27.86 t/m<sup>2</sup> en cada una de ellas. Como el cajón de estudio mide 40 metros se sitúan dos defensas en el cajón.

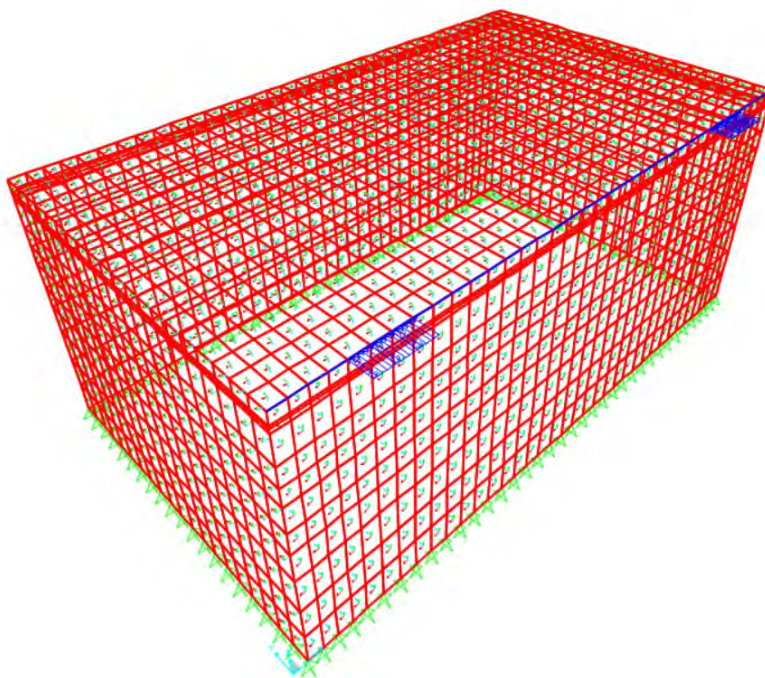


Figura 133 – modelización del impacto por atraque

### 3.11.2. Cargas de amarre

Las cargas de amarre son las que transmite un buque a través del contacto con este y la estructura o a través de las líneas de defensa. Estas cargas son causadas por acciones exteriores, fundamentalmente medioambientales, que se ejercen sobre el buque atracado. Estas acciones son:

- Viento
- Corrientes
- Oleaje
- Resonancia por fenómenos de ondas largas
- Mareas
- Ubicación del amarre en zonas con flujos o reflujos importantes de agua
- Paso de otros buques
- Carga/descarga del buque
- Hielo

De todas las acciones que pueden provocar las fuerzas de amarre solo se tendrá en cuenta el viento ya que las demás no son significantes al considerar que el muelle está a abrigo y que el mar mediterráneo no tiene mareas importantes.

La carga de amarre debida al viento se calcula siguiendo el punto 3.4.2.3.5. SOBRECARGA DE OPERACIONES DE BUQUES, apartado b<sub>2</sub> de la ROM 0.2-90 (Puertos del Estado, 1990).

Se considera una velocidad máxima del viento de 22 m/s, ya que si la velocidad es mayor no se realizan las operaciones de carga y descarga del buque, y varios ángulos de incidencia y con el buque en carga y en lastre.

Resumen de los esfuerzos:

Condición	Ángulo de incidencia	Esfuerzo transversal [t]	Esfuerzo longitudinal [t]
<b>Carga</b>	0°	0	54.01
	30°	44.58	45.44
	60°	86.02	37.2
	90°	105.84	22.33
	120°	86.02	7.47
	150°	44.58	-0.77
	180°	0	-9.34
<b>Lastre</b>	0°	0	55.63
	30°	56.03	44.93
	60°	110.64	36.07
	90°	137.05	18.99
	120°	110.64	1.91
	150°	56.03	-6.95
	180°	0	-17.65

Tabla 3-19 Cargas de amarre totales

En la Tabla 3-19 se indican los resultados totales obtenidos para los diversos ángulos de incidencia. Los bolardos se instalan cada 20 metros y tienen una capacidad de 100 toneladas cada uno de ellos, por lo que se encuentran del lado de la seguridad. En el modelo se modelizaran los bolardos como una carga puntual de 996 kN en direcciones formando 0°, 30°, 60° y 90°.

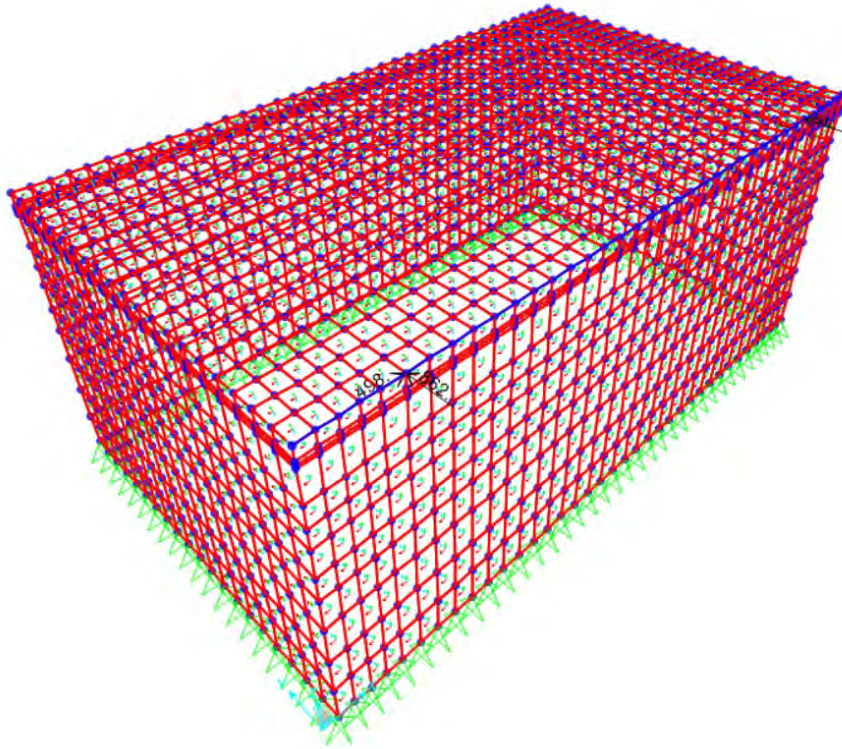


Figura 134 – Modelización Amarre

### 3.11.3. Combinación de acciones

Como el cajón se ha comprobado anteriormente que cumple durante las fases de fondeo y flotación solo se considera para ELU el caso en que el muelle está en servicio. Por ello, la combinación de acciones es la que se muestra en la Figura 135.



Situación Persistente o transitoria	Comb	$P_0, P_a$	$P_1, P_{1z}$	$E_a$	$P_r, P'_r$	$E_r$	$P_t$	$E_T$	$E_{co}, P_{co,t}$	$E_{to}, P_{to,t}$	$P_{sc}$
Fase de flotación ▲+	ELU1	1,00/ 1,35 <sup>(*)</sup>	1,35	1,35							
Fase de Fondeo ▲	ELU2	1,00/ 1,35 <sup>(*)</sup>	1,35	1,35							
Presión sobre una celda resto vacío +	ELU3					1,50					
<b>MUELLES (aguas abrigadas)</b>											
Servicio ▲◆	ELU4	1,00/ 1,35 <sup>(*)</sup>	1,00/ 1,35 <sup>(*)</sup>	1,35	1,00/ 1,35 <sup>(*)</sup>	1,50	1,00/ 1,35 <sup>(*)</sup>	1,00/ 1,50 <sup>(*)</sup>			1,50
<b>DIQUES</b>											
Presión Ext. Seno Oleaje ▲◆	ELU5	1,00/ 1,35 <sup>(*)</sup>	1,00/ 1,35 <sup>(*)</sup>	1,35	1,00/ 1,35 <sup>(*)</sup>	1,50	1,00/ 1,35 <sup>(*)</sup>	1,00/ 1,50 <sup>(*)</sup>		1,50	$\frac{\psi_0}{2} \times 1,50^{(++)}$
Oleaje ▲◆	ELU6	1,00/ 1,35 <sup>(*)</sup>	1,00/ 1,35 <sup>(*)</sup>	1,00	1,00/ 1,35 <sup>(*)</sup>	1,00	1,00/ 1,35 <sup>(*)</sup>	1,00/ 1,50 <sup>(*)</sup>	1,50		$\frac{\psi_0}{2} \times 1,50^{(++)}$
$P_0$	Peso Propio del cajón (solera y zapatas, $P_{oc}$ , y paredes $P_{op}$ ). $P_0 = P_{oc} + P_{op}$ .										
$P_a$	Empuje ascensional del agua (empuje de Arquímedes).										
$P_1$	Peso del agua contenida en las celdas del cajón.										
$P_{1z}$	Peso del agua que gravita sobre las zapatas.										
$E_a$	Empuje Hidrostático.										
	Empuje de agua en trasdós de muelle o dique.										
$P'_r$	Peso del Relleno que se transmite por el fuste (Efecto Silo).										
$P_r$	Peso del Relleno de tierras que se transmite por la superficie de la celda (Efecto Silo).										
$E_r$	Acciones horizontales (Empuje) debidas al Relleno (Efecto Silo).										
$E_T, P_t$	Empuje de Tierras sobre trasdós de muelles o diques trasdosados, Peso de tierras sobre zapata.										
$E_{so}$	Seno de Oleaje (Temporal de diseño).										
$P_{so,t}$	Sub-Presión hidrodinámica debida al paso del seno de la ola.										
$E_{co}$	Cresta de Oleaje (Temporal de diseño).										
$P_{co,t}$	Sub-Presión hidrodinámica debida al paso de la cresta de la ola.										
$P_{sc}$	Sobrecarga de uso.										
<b>Leyenda</b>	<p>▲ Posible estado crítico para paredes exteriores.</p> <p>+ Posible estado crítico para paredes interiores.</p> <p>◆ Posible estado crítico para la cimentación.</p> <p>(*) A efectos del cálculo de la solera, resulta necesario considerar ambas posibilidades. En el caso de acciones debidas al terreno se mayorarán o minorarán simultáneamente los efectos verticales y horizontales.</p> <p>(++) Se da por supuesto que la acción del oleaje es predominante, siendo ésta la situación más habitual.</p>										

Figura 135 – Tabla de combinación para ELU

En ELS se estudia la situación persistente para muelles (aguas abrigadas) tal como se muestra en la Figura 136.

Situación Persistente	Comb	$P_0, P_a$	$P_l, P_{lz}$	$E_a$	$P_r, P'_r$	$E_r$	$P_t$	$E_T$	$E_{co}, P_{co,s}$	$E_{so}, P_{so,s}$	$P_{sc}$
<b>MUELLES (aguas abrigadas)</b>											
Servicio ▲◆+	ELS	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			$\psi_2$
<b>DIQUES</b>											
Presión Ext. Seno Oleaje ▲◆+	ELS	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	$\psi_2$
Presión int. Cresta Oleaje ▲◆+	ELS	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		$\psi_2$
$P_0$	Peso Propio del cajón (solera y zapatas, $P_{oc}$ , y paredes $P_{op}$ ). $P_0 = P_{oc} + P_{op}$ .										
$P_a$	Empuje ascensional del agua (empuje de Arquímedes – situación cuasipermanente).										
$P_l$	Peso del agua contenida en las celdas del cajón.										
$P_{lz}$	Peso del agua que gravita sobre las zapatas (situación cuasipermanente).										
$E_a$	Empuje Hidrostático (situación cuasipermanente).										
	Empuje de agua en trasdós de muelle o dique (situación cuasipermanente).										
$P'_r$	Peso del Relleno que se transmite por el fuste (Efecto Silo).										
$P_r$	Peso del Relleno de tierras que se transmite por la superficie de la celda (Efecto Silo).										
$E_r$	Acciones horizontales (Empuje) debidas al Relleno (Efecto Silo).										
$E_T, P_t$	Empuje de Tierras sobre trasdós de muelles o diques trasdosados, Peso de tierras sobre zapata.										
$E_{so}$	Seno de Oleaje (ola cuasipermanente).										
$P_{so,s}$	Sub-Presión hidrodinámica debida al paso del seno de la ola (ola cuasipermanente).										
$E_{co}$	Cresta de Oleaje (ola cuasipermanente).										
$P_{co,s}$	Sub-Presión hidrodinámica debida al paso de la cresta de la ola (ola cuasipermanente).										
$P_{sc}$	Sobrecarga de uso (valor cuasi permanente).										
Leyenda	▲ Posible estado crítico para paredes exteriores. + Posible estado crítico para paredes interiores. ◆ Posible estado crítico para la cimentación.										

Figura 136 – Tabla de combinación para ELS

#### 3.11.4. Resultados cajón muelle

Solo se obtienen los resultados de las paredes exteriores ya que anteriormente ya se ha comprobado que las interiores se pueden dimensionar con hormigón con fibras.

#### ELU

Los resultados para ELU del Muelle en servicio son:

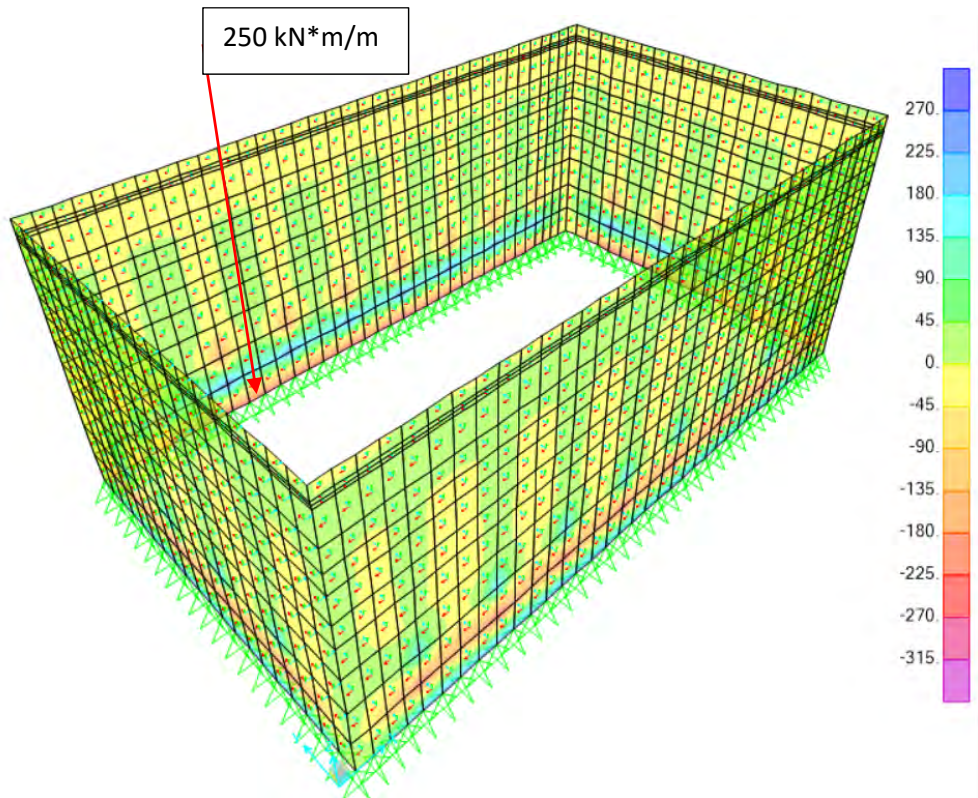


Figura 137 – M22 ELU Muelle

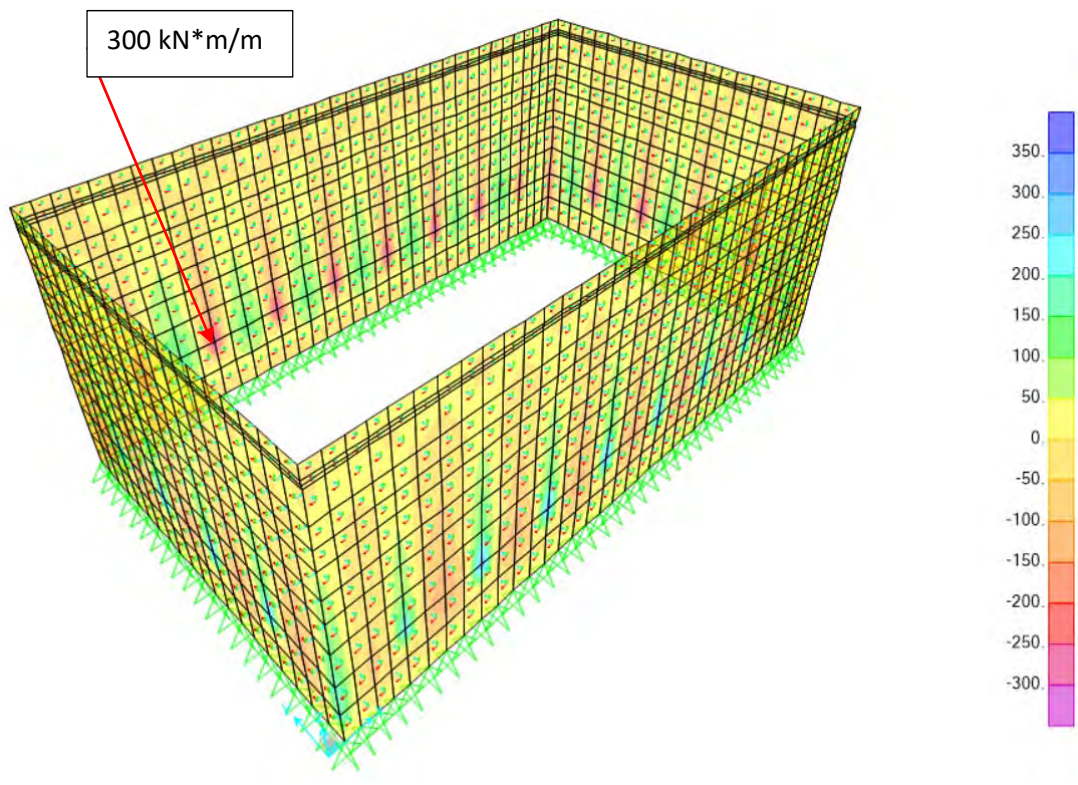


Figura 138 – M11 ELU Muelle



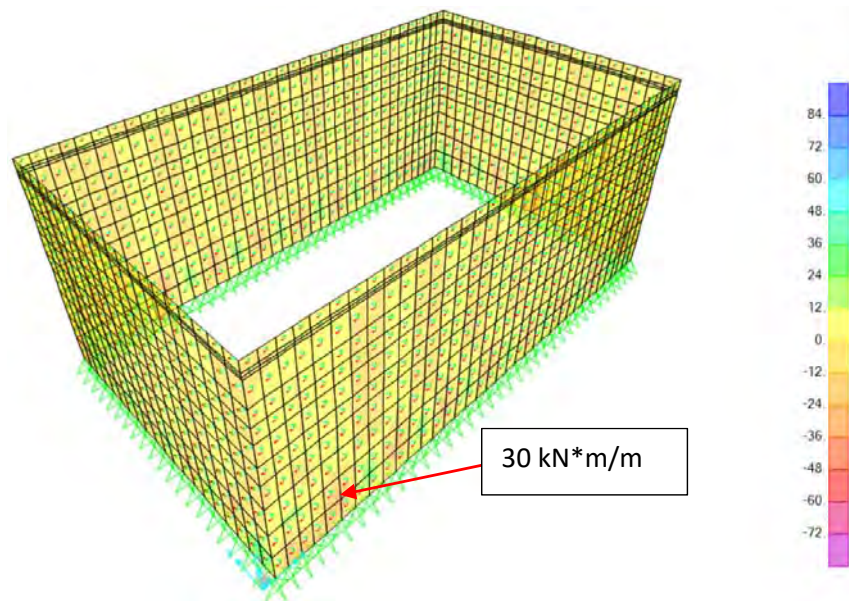


Figura 139 – M12 ELU Muelle

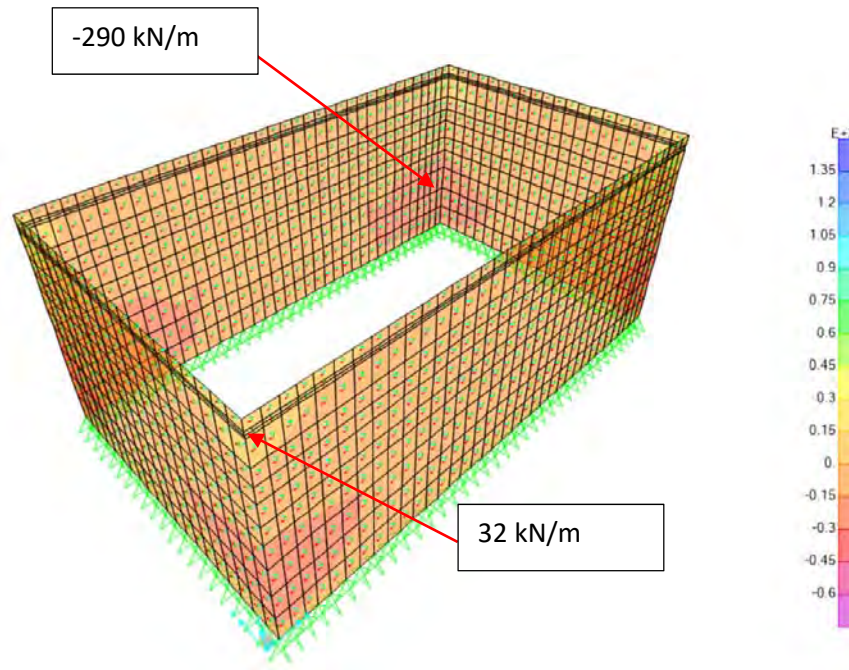


Figura 140 – F11 ELU Muelle



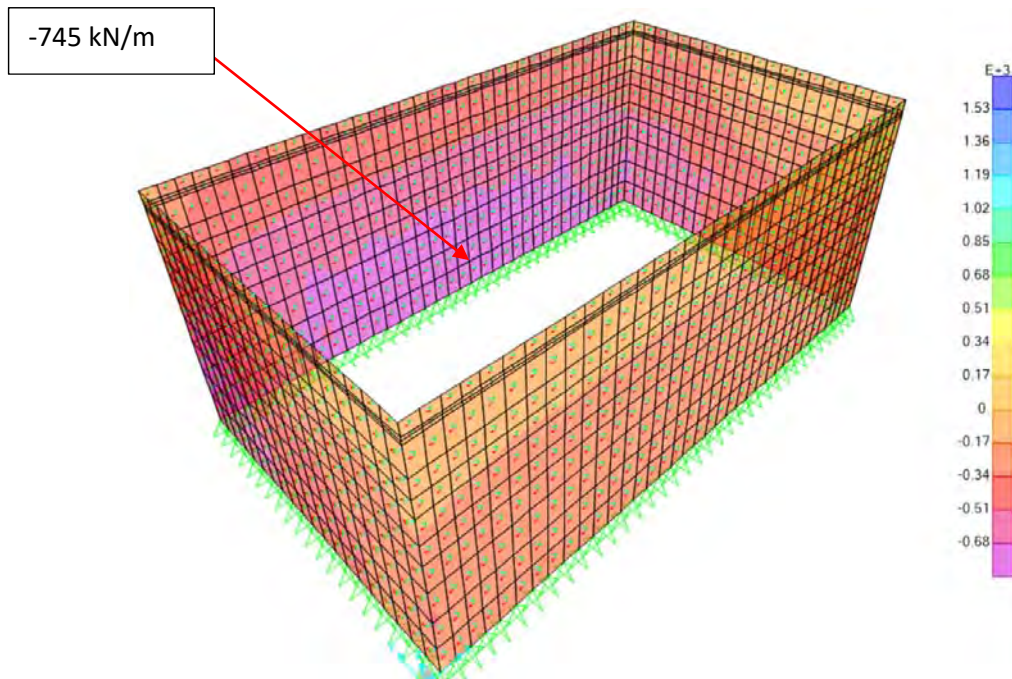


Figura 141 – F22 ELU Muelle

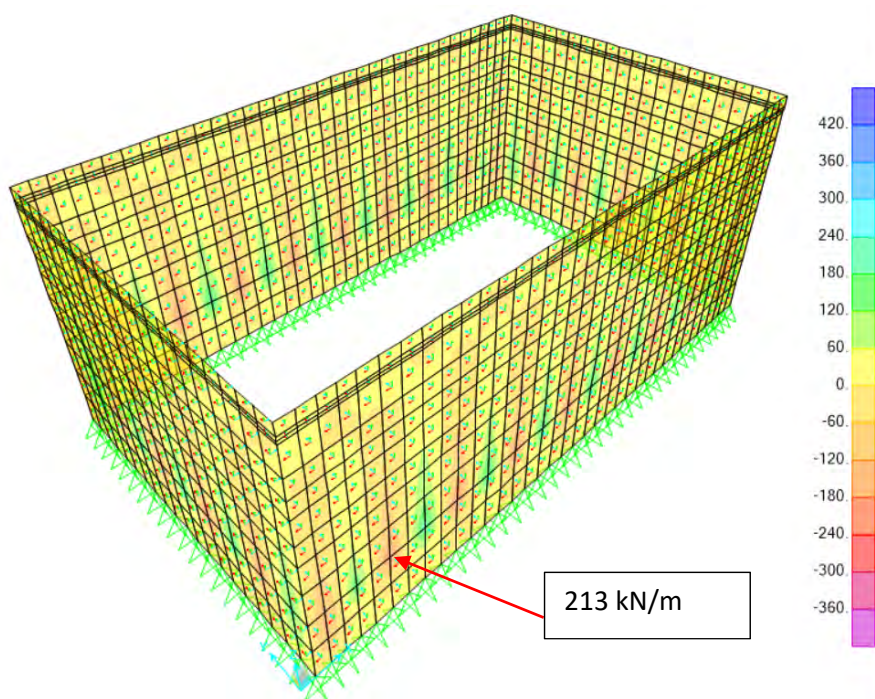


Figura 142 – V13 ELU Muelle

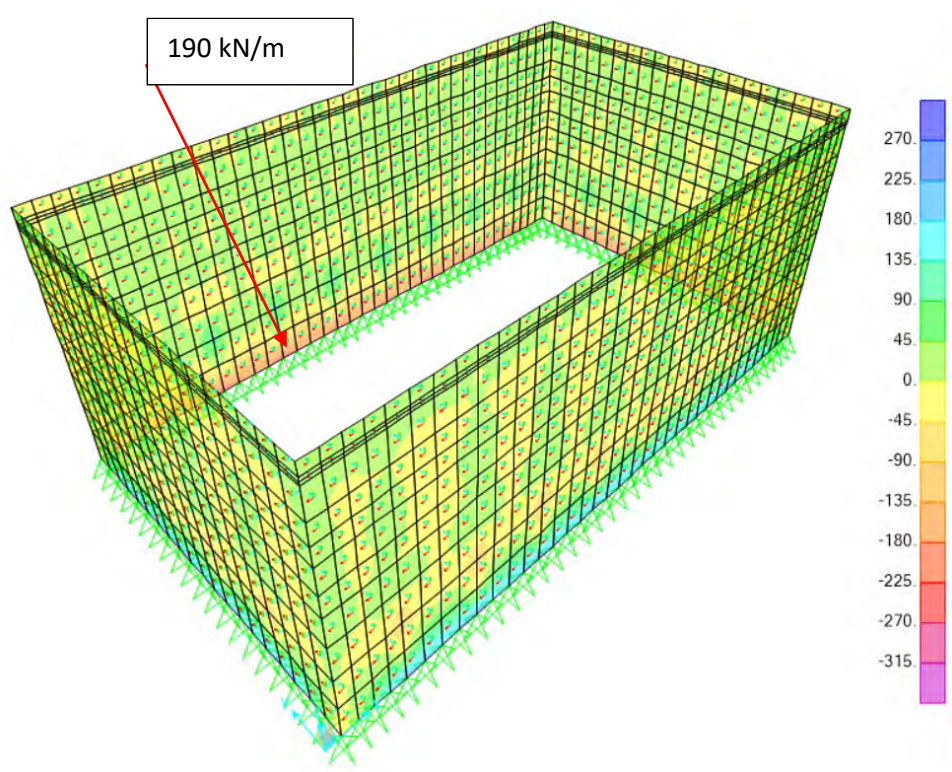


Figura 143 – V23 ELU Muelle

ELS

Los resultados para ELS Muelle son:

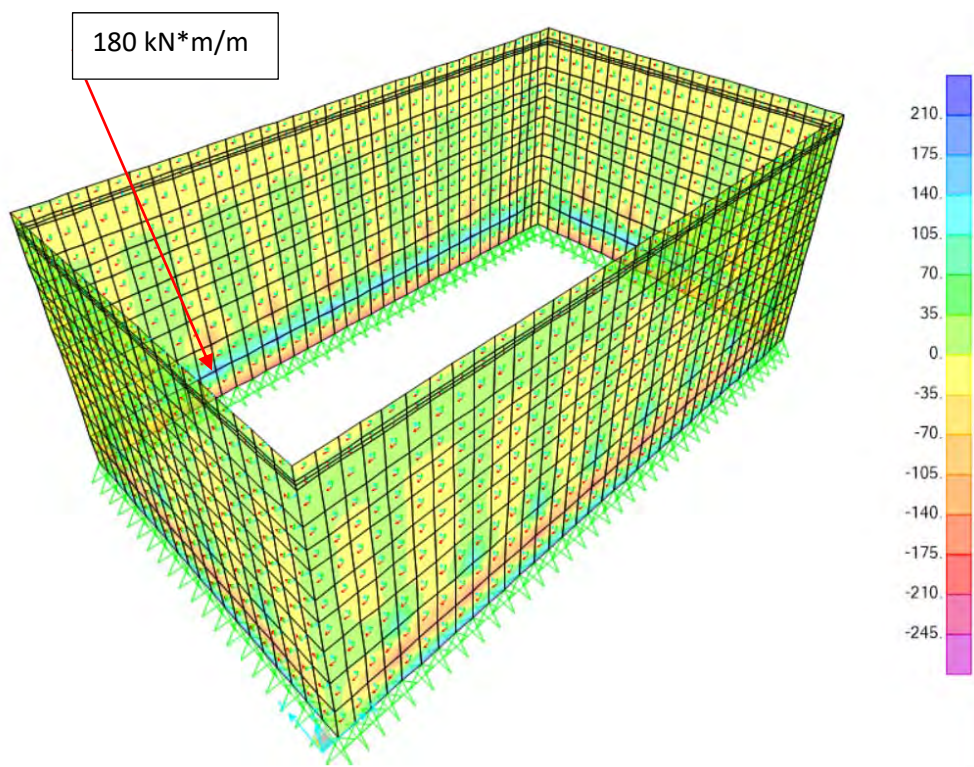


Figura 144 – M22 ELS Muelle



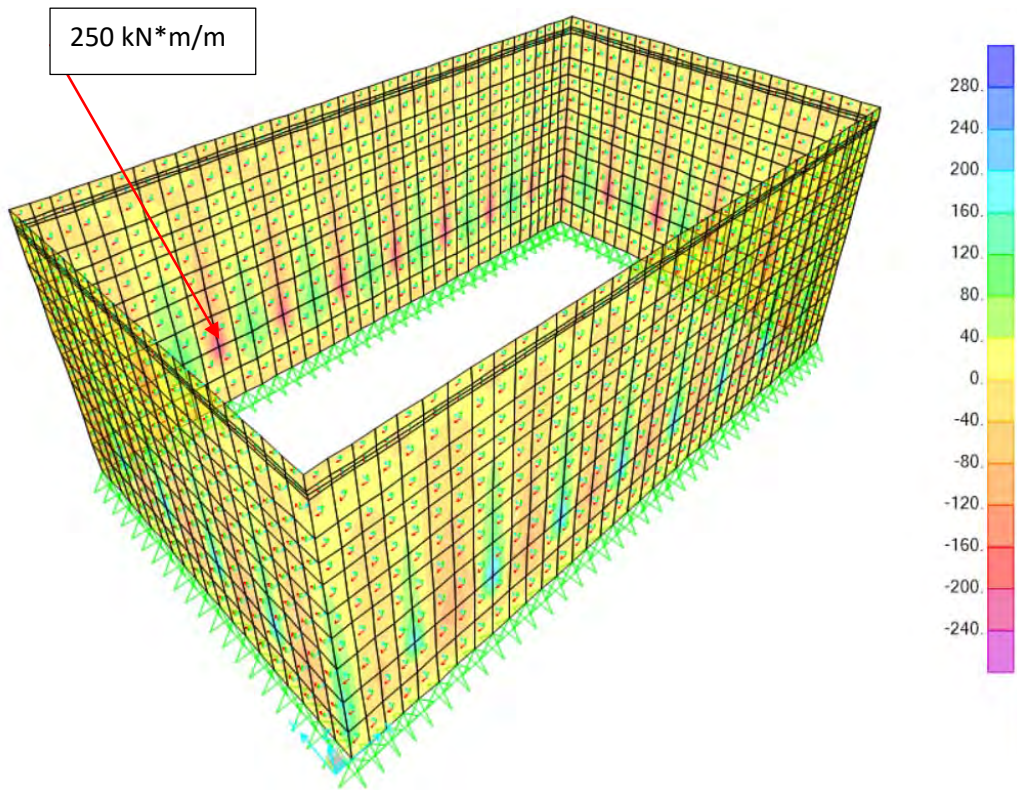


Figura 145 – M11 ELS Muelle

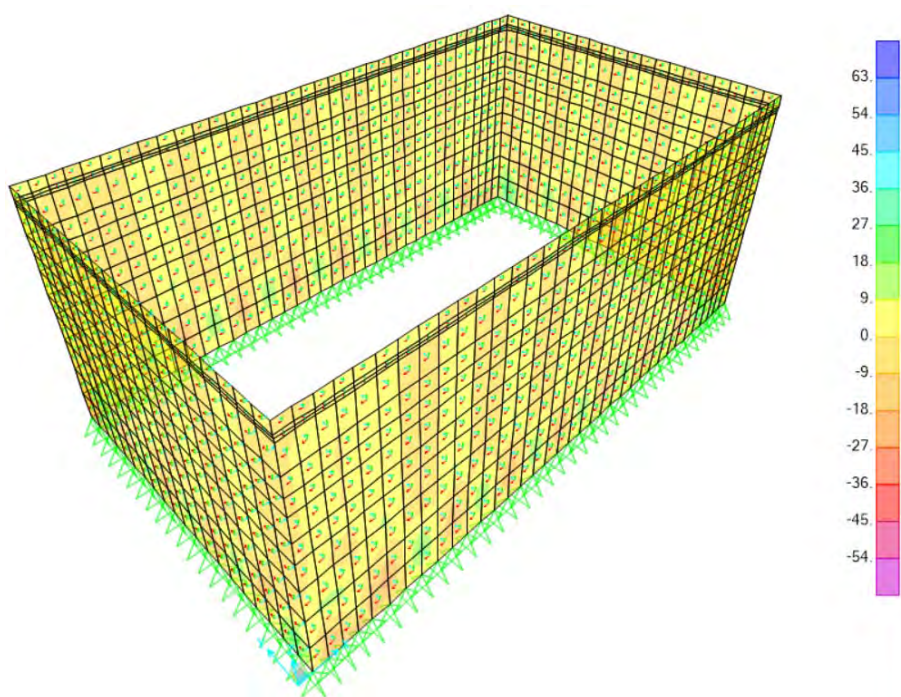


Figura 146 – M12 ELS Muelle

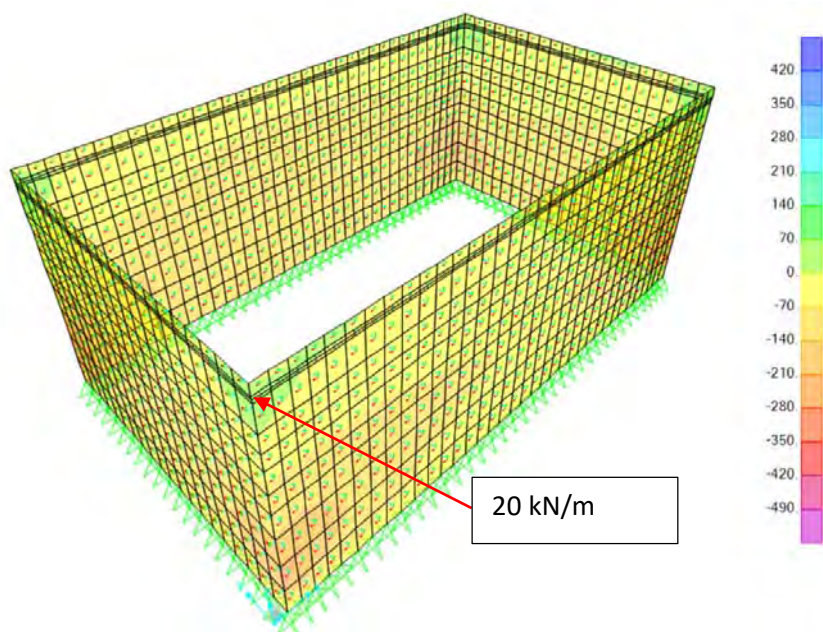


Figura 147 – F11 ELS Muelle

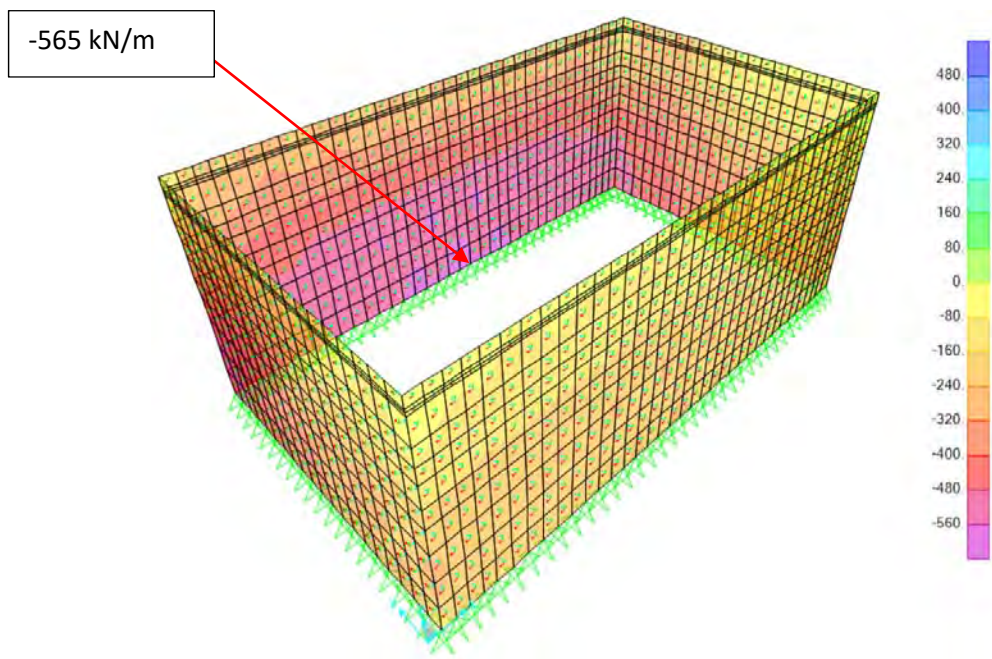


Figura 148 – F22 ELS Muelle

### 3.11.5. Dimensionamiento ELU

Las paredes exteriores en el cajón con celdas rectangulares tienen un espesor de 0.40 m en el proyecto original con hormigón convencional.



M11 máximo

	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M11 máximo</b>	300	0.2	<b>300.2</b>	<b>-143</b>

Con un espesor de 0.40m no cumple para ninguna de las dosificaciones estudiadas. Para obtener un resultado más afinado en este caso se tiene en cuenta la cartela. En el centro de la cartela el espesor es de 0.6 y coincide con el momento máximo de 300 kN\*m/m, y donde la cartela acaba el momento es de 210 kN\*m/m.

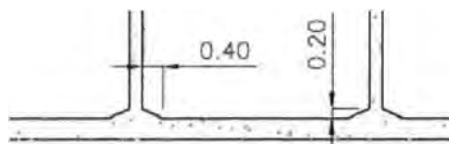


Figura 149 – detalle de la cartela

En este caso y con una dosificación de 50 kg/m<sup>3</sup> sí que cumple en el centro de la cartela, pero con unas dosificaciones menores no.

Donde la cartela acaba en cambio no cumple con ninguna dosificación, por lo que se debería cambiar la geometría de la cartela haciéndola mayor, ya que se necesita un espesor de 0.48 metros para que cumpla.

M22 máximo

	M22 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M22 máximo</b>	250	0.17	<b>250.17</b>	<b>-738</b>

En este caso cumple solamente si se utiliza una dosificación de 50 kg/m<sup>3</sup>, para las otras dosificaciones no cumple.

Tracción máxima con momento

	N (kN/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)
<b>Tracción máxima</b>	<b>32</b>	5	0.6	<b>5.6</b>

En este caso cumple con cualquiera de las 3 dosificaciones propuestas.

Cortante máximo

	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)	V (kN/m)	N (kN/m)
<b>Cortante máximo</b>	213	26	<b>214.58</b>	<b>-195</b>

En este caso cumple a cortante con cualquiera de las 3 dosificaciones propuestas.

#### Tracción máxima con cortante

	N (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)	V (kN/m)
<b>Tracción máxima con cortante</b>	<b>32</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>6.08</b>

En este caso cumple a cortante con cualquiera de las 3 dosificaciones propuestas.

#### 3.11.6. Dimensionamiento ELS

Las paredes exteriores en el cajón con celdas rectangulares tienen un espesor de 0.40 m en el proyecto original con hormigón convencional.

#### M11 máximo

	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M11 máximo</b>	<b>250</b>	<b>0.7</b>	<b>250.7</b>	<b>-120</b>

Model Code 2010 en su artículo 7.7.4.2 no proporciona ninguna formulación para determinar la abertura de fisura en caso de presencia únicamente de fibras sin disponer armadura convencional. Por tanto no es posible determinar la abertura de fisura en este caso. Sin embargo el apartado 7.7.4.3 “Minimum reinforcement for crack control” indica que si  $f_{Ftsm} > f_{ctm}$  la condición de armadura mínima se cumple sin necesidad de armadura convencional. En el caso que nos ocupa  $f_{ctm} = 3.21$  MPa para un hormigón H-35 y  $f_{Ftsm} = 5.71$  MPa para una dosificación de  $30 \text{ kg/m}^3$

#### M22 máximo

	M22 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)	N (kN/m)
<b>M22 máximo</b>	<b>180</b>	<b>0.2</b>	<b>180.2</b>	<b>-550</b>

En este caso pasa lo mismo que en la combinación M11 máximo.

#### Tracción máxima

	N (kN/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	M (kN*m/m)
<b>Tracción máxima</b>	<b>20</b>	<b>3</b>	<b>0.8</b>	<b>3.8</b>

No se produce fisuración.

### 3.11.7. Conclusiones del dimensionamiento del muelle cajón con celdas rectangulares

Al no tener los esfuerzos debidos al oleaje los momentos resultantes han disminuido pero no mucho debido a que el empuje hidrostático del agua produce esfuerzos mayores, que el empuje del relleno considerando el efecto silo no es capaz de compensar.

Como los momentos siguen siendo muy altos, la pared exterior no cumple con la geometría original con hormigón con fibras en todo el elemento. Es por esto que para dimensionar el elemento con hormigón con fibras se debería;

- Aumentar la cartela para que el espesor aumente en las zonas de momentos máximos
- Aumentar el espesor de la pared en toda su longitud
- Una combinación de las dos anteriores
- Armar con armadura convencional los primeros metros

### 3.12. Análisis económico de las diferentes soluciones

En el análisis económico se calcula solamente la diferencia de coste entre las diferentes soluciones que se han estudiado, por lo que solo se considera el coste del hormigón y de la armadura o las fibras. El resto de costes se consideran iguales en todas las opciones ya que la geometría exterior del cajón es la misma en todos los casos.

Los costes han sido proporcionados por los tutores del trabajo debido a que ellos tienen acceso a precios de mercado. Todos los precios incluyen la mano de obra necesaria para su colocación teniendo en cuenta pluses por nocturnidad, fines de semana y festivos.

Los precios considerados son:

- Hormigón de 35 MPa: 90 euros/m<sup>3</sup>
- Armadura acero B500S: 1.26 euros/kg
- Fibras estructurales de acero: 1.5 euros/kg
- Fibras estructurales plásticas: 3.5 euros/kg

#### 3.12.1. Solución original

La solución original es dique cajón con celdas rectangulares de hormigón armado con armadura convencional.

Las mediciones de materiales de esta solución son:

- HA-30= 2329.6 m<sup>3</sup>
- Armadura acero B500S= 234301 kg

	Precio	Unidades	Coste (euros)
HA-35	90	2329.6 m <sup>3</sup>	209664
Acero B500S	1.26	234301 Kg	295219.26
<b>Total (euros)</b>			<b>504883.26</b>

Con lo que el coste total de esta solución es de 504.883 euros.

### 3.12.2. Cajón con celdas circulares

En esta solución, valida tanto para dique como para muelle, las celdas rectangulares se sustituyen por celdas circulares de hormigón con fibras manteniendo los espesores mínimos de las paredes. En este caso se puede utilizar cualquiera de las dosificaciones de fibras estudiadas, pero para que sea más económica se considera una cuantía de 8.5 kg/m<sup>3</sup> de fibras plásticas y de 30 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero.

Las mediciones de materiales de esta solución son:

- H-30= 5884.2 m<sup>3</sup>
- Fibras plásticas= 50016 kg

	Precio	unidades	Coste (euros)
H-35	90	5884 m <sup>3</sup>	529560
Fibras plásticas	3.5	50016 Kg	175056
<b>Total (euros)</b>			<b>704616</b>

o:

- H-30= 5884.2 m<sup>3</sup>
- Fibras acero= 176526 kg

	Precio	unidades	Coste (euros)
H-35	90	5884 m <sup>3</sup>	529560
Fibras acero	3.5	176526 Kg	617841
<b>Total (euros)</b>			<b>1147401</b>

Esta solución tiene un coste de 704.616 euros si se utiliza hormigón con fibras plásticas o 1.1147.401 euros si se utilizan fibras de acero.

### 3.12.3. Cajón con celdas circulares optimizadas

En esta solución, valida tanto para dique como para muelle, se optimiza el cajón con celdas circulares manteniendo los espesores mínimos de las paredes. En este caso se puede utilizar cualquiera de las dosificaciones de fibras estudiadas, pero para que sea más económica se considera una cuantía de 8.5 kg/m<sup>3</sup> de fibras plásticas y de 30 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero.



Las mediciones de materiales de esta solución son:

- H-30= 4085.69 m<sup>3</sup>
- Fibras plásticas= 34728 kg

	Precio	unidades	Coste (euros)
H-35	90	4085.69 m <sup>3</sup>	367712.1
Fibras plásticas	3.5	34728 Kg	121548
<b>Total (euros)</b>			<b>489260.1</b>

o:

- H-30= 4085.69 m<sup>3</sup>
- Fibras acero= 122570 kg

	Precio	unidades	Coste (euros)
H-35	90	4085.69 m <sup>3</sup>	367712.1
Fibras acero	3.5	122570 Kg	428995
<b>Total (euros)</b>			<b>796707.1</b>

Esta solución tiene un coste de 489.260 euros si se utiliza hormigón con fibras plásticas o 796.707 euros si se utilizan fibras de acero

#### 3.12.4. Incremento del tamaño de las cartelas exteriores

Esta solución es un muelle cajón con celdas rectangulares de hormigón con fibras, manteniendo las medidas del cajón original excepto las cartelas exteriores que tienen la geometría que se muestra en la Figura 150.

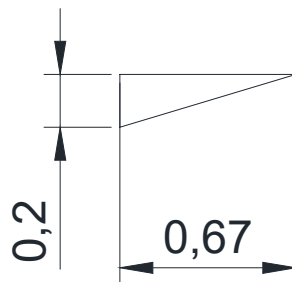


Figura 150 – Cartela con la nueva geometría

Esta solución solo es válida si se utiliza hormigón con una cuantía de fibras de acero de 50 kg/m<sup>3</sup>.

Las mediciones de materiales de esta solución son:

- H-30= 2352.9 m<sup>3</sup>
- Fibras de acero= 117646 kg

	Precio	unidades	Coste (euros)
H-35	90	2352.9 m <sup>3</sup>	211761
Fibras acero	3.5	117646 Kg	411761
<b>Total (euros)</b>			<b>623522</b>

Con lo que el coste total de esta solución es de 623.522 euros.

### 3.12.5. Incremento del espesor de la pared exterior a 0.48 m

Esta solución es un muelle cajón con celdas rectangulares de hormigón con fibras, manteniendo las medidas del cajón original excepto el espesor de las paredes exteriores que aumenta a 0.48 m. Esta solución solo es válida si se utiliza hormigón con una cuantía de fibras de acero de 50 kg/m<sup>3</sup>.

Las mediciones de materiales de esta solución son:

- H-30= 2502.4 m<sup>3</sup>
- Fibras de acero= 125118 kg

	Precio	unidades	Coste (euros)
H-35	90	2502.4 m <sup>3</sup>	225216
Fibras acero	3.5	125118 Kg	437913
<b>Total (euros)</b>			<b>663129</b>

Con lo que el coste total de esta solución es de 663.129 euros.

### 3.12.6. Incremento del espesor de la pared exterior a 0.75 m

Esta solución es un dique cajón con celdas rectangulares de hormigón con fibras, manteniendo las medidas del cajón original excepto el espesor de las paredes exteriores que aumenta a 0.75 m. Esta solución solo es válida si se utiliza hormigón con una cuantía de fibras de acero de 50 kg/m<sup>3</sup>.

Las mediciones de materiales de esta solución son:

- H-30= 3092 m<sup>3</sup>
- Fibras de acero= 154594 kg

	Precio	unidades	Coste (euros)
H-35	90	3092 m <sup>3</sup>	278280
Fibras acero	3.5	154594 Kg	541079
<b>Total (euros)</b>			<b>819359</b>

Con lo que el coste total de esta solución es de 819.359 euros.

### 3.12.7. Resumen análisis económico

Los costes totales de cada una de las soluciones son:

Tipo	Solución	Armadura	Coste (euros)
Dique/ muelle	Celdas rectangulares con la geometría original	Convencional	504.883
Dique/ muelle	Celdas circulares	Fibras plásticas	704.616
Dique/ muelle	Celdas circulares	Fibras de acero	1.147.401
Dique/ muelle	Celdas circulares optimizadas	Fibras plásticas	489.260
Dique/ muelle	Celdas circulares optimizadas	Fibras de acero	796.707
Muelle	Cajón con celdas rectangulares y aumentar cartelas	Fibras de acero	623.522
Muelle	Incremento espesor pared exterior a 0.48 m	Fibras de acero	663.129
Dique	Incremento espesor pared exterior a 0.75 m	Fibras de acero	819.359

Tabla 3-20 Resumen costes

Como las fibras se distribuyen uniformemente en el hormigón un incremento de los metros cúbicos de hormigón comporta un incremento de los kilogramos de fibras necesarios incrementando el precio final. En cambio en la armadura tradicional se coloca la armadura en las zonas con más solicitaciones con lo que una variación de la geometría no afecta tanto el precio final.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se han desarrollado modelos tridimensionales mediante elementos finitos tipo placa para el análisis y dimensionamiento de cajones con cántaras rectangulares y circulares. Estos modelos permiten obtener esfuerzos mucho más precisos que los modelos simplificados que preconiza el Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias del Ministerio de Fomento (Ministerio de Fomento, 2006) cuya aplicación a cántaras circulares es problemática.

A partir de los modelos citados se ha procedido a dimensionar con hormigón con fibras, metálicas y plásticas, y con diversas cuantías, los tabiques que conforman los cajones. No se ha verificado losa inferior, que es fácilmente armable de forma convencional, ni losa superior, cuyos esfuerzos dependen mucho del uso y, por tanto, no es generalizable. A continuación se resumen los resultados obtenidos por tipos de cajones:

- a. Cajones con cántaras rectangulares. Los tabiques interiores se pueden construir con hormigón con fibras, eliminando toda la armadura pasiva, sin necesidad de aumentar espesores. Los tabiques exteriores requieren incremento de espesor tanto en el caso de que el cajón se utilice en la construcción de un muelle como en el caso de un dique. En ambos casos se considera una cuantía de  $50 \text{ kg/m}^3$  de fibras de acero.
- b. Cajones con cántaras circulares situadas en misma posición que las rectangulares. En todos los casos los tabiques se pueden ejecutar únicamente con fibras. En este caso se considera una cuantía de  $8.5 \text{ kg/m}^3$  de fibras plásticas o una cuantía de  $30 \text{ kg/m}^3$  de fibras de acero.
- c. Cajones con cántaras al tresbolillo. En todos los casos los tabiques se pueden ejecutar únicamente con fibras. En este caso se considera una cuantía de  $8.5 \text{ kg/m}^3$  de fibras plásticas o una cuantía de  $30 \text{ kg/m}^3$  de fibras de acero.



Con los precios actuales de los materiales, y de la mano de obra necesaria para su colocación, no sale rentable en general el uso de las fibras en dique cajones excepto si es un cajón con celdas circulares optimizado, situando las celdas al tresbolillo. Esta solución es viable si el precio de modificar el paraguas del cajonero se amortiza con un gran número de cajones o si ya se tiene un cajonero ya preparado para esta geometría.

En cambio, si el cajón está destinado a materializar un muelle, se pueden considerar diversas opciones utilizando hormigón con fibras ya que la diferencia de precios no es muy grande (120.000 euros de diferencia dependiendo de la opción) y a cambio se disminuye la complejidad de la obra al no ser necesario tener varios equipos de ferrallistas trabajando 24h en el cajonero.

Hay que tener en cuenta que este análisis es con los precios de materiales y mano de obra actuales. Hoy en día el uso de las fibras aún no está muy extendido, por lo que cuando se use en más aplicaciones el precio de las fibras podría disminuir. Estos precios también están afectados por la situación geográfica, ya que el precio de la mano de obra puede variar mucho entre diversos países, con lo que en otras partes del mundo podría ser una solución más rentable económicamente que actualmente en España.

El uso de hormigón con fibras comporta diversas ventajas que no son fáciles de cuantificar en el análisis económico pero que pueden afectar económicamente, como es el control de calidad ya que con el hormigón con fibras se evitan todos los errores de ferrallado y se evita tener que realizar controles de calidad de la posición de la armadura antes de hormigonar, cosa difícil debido al hormigonado continuo típico de la construcción con cajoneros. El disminuir el número de personas trabajando, especialmente en horario nocturno, reduce considerablemente los riesgos laborales. La no presencia de armadura facilita el vertido y la compactación, mediante vibrado, del hormigón, mejorando la compactación que es un parámetro muy importante en una obra marítima.

En definitiva, la principal conclusión es que la sustitución de las armaduras convencionales por fibras, en las paredes de los cajones marítimos, es viable desde el punto de vista técnico y, en muchas ocasiones, desde el punto de vista económico.

## 5. Bibliografía

Balouch, S.U., Forth, J.P., Granju J. (2010) *Surface corrosion of steel reinforced concrete*. Cement and Concrete Research, Vol. 40, Issue 3, pp 410-414.

Baños Cros, A. (2014) *Technical and economical viability assessment of the use of srfc in segmental bridges*. Master Thesis, UPC.

Blunt, J., Jen, G., Ostertag C.P. (2015) *Enhancing corrosion resistance of reinforced concrete structures with hybrid fiber reinforced concrete*. Corrosion Science, Vol. 92, pp 182-191.

De la Fuente, A. (2011) *Nueva Metodología para el diseño de tubos de hormigón estructural*. Tesis Doctoral, UPC.

Goda, Y. (2010) *Random Seas and design of maritime structures*. 3<sup>rd</sup> Edition. World Scientific Publishing.

International Federation for Structural Concrete (2010). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*.

Ministerio de Fomento (2006). *Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias*.

Ministerio de Fomento (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*. Madrid.

Puertos del Estado (2001). *ROM 0.0. Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias. Parte 1*.

Puertos del Estado (1990). *ROM 0.2-90. Acciones en el proyecto de obras marítimas y portuarias*.

Puertos del Estado (1991). *ROM 0.3-91. Oleaje. Anexo I. Clima marítimo en el litoral español*

Puertos del Estado (1994). *ROM 0.5. Recomendaciones geotécnicas para el proyecto de obras marítimas y portuarias.*

Takahashi, S. Shimosako, K., Hazawa, M. (2015) *Performance Design for Maritime Structures.* Design of Coastal Structures and Sea Defenses, pp 77-105.

Wood, R.H. (1998) *The reinforcement of Slabs in Accordance with a Pre-Determined Field of Moments.* Concrete, V.2, No. 2, pp 69-76.

# Anejo 1



## Contenido

1.	Resultados modelo celdas rectangulares.....	A1.1
1.1.	ELU.....	A1.1
1.1.1.	Paredes exteriores.....	A1.1
1.1.2.	Paredes interiores .....	A1.15
1.1.3.	Resumen ELU celdas rectangulares.....	A1.29
1.2.	ELS .....	A1.30
1.2.1.	Paredes exteriores.....	A1.30
1.2.2.	Paredes interiores .....	A1.37
1.2.3.	Resumen ELS celdas rectangulares .....	A1.44
2.	Resultados modelo celdas circulares .....	A1.44
2.1.	ELU.....	A1.44
2.1.1.	Paredes exteriores.....	A1.44
2.1.2.	Paredes interiores .....	A1.58
2.1.3.	Resumen ELU celdas circulares .....	A1.72
2.2.	ELS .....	A1.73
2.2.1.	Paredes exteriores.....	A1.73
2.2.2.	Paredes interiores .....	A1.80
2.2.3.	Resumen ELS celdas circulares .....	A1.87
3.	Resultados modelo celdas circulares optimizadas.....	A1.87
3.1.	ELU.....	A1.87
3.1.1.	Paredes exteriores.....	A1.87
3.1.2.	Paredes interiores .....	A1.94
3.1.3.	Resumen ELU celdas circulares optimizadas.....	A1.102
3.2.	ELS .....	A1.102
3.2.1.	Paredes exteriores.....	A1.102
3.2.2.	Paredes interiores .....	A1.107
3.2.3.	Resumen ELS celdas circulares optimizadas .....	A1.112

## 1. Resultados modelo celdas rectangulares

A continuación se muestran los resultados obtenidos en Estado Límite Último tanto para las paredes interiores como exteriores. Los resultados ya se encuentran mayorados.

### 1.1. ELU

#### 1.1.1. Paredes exteriores

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje horizontal:

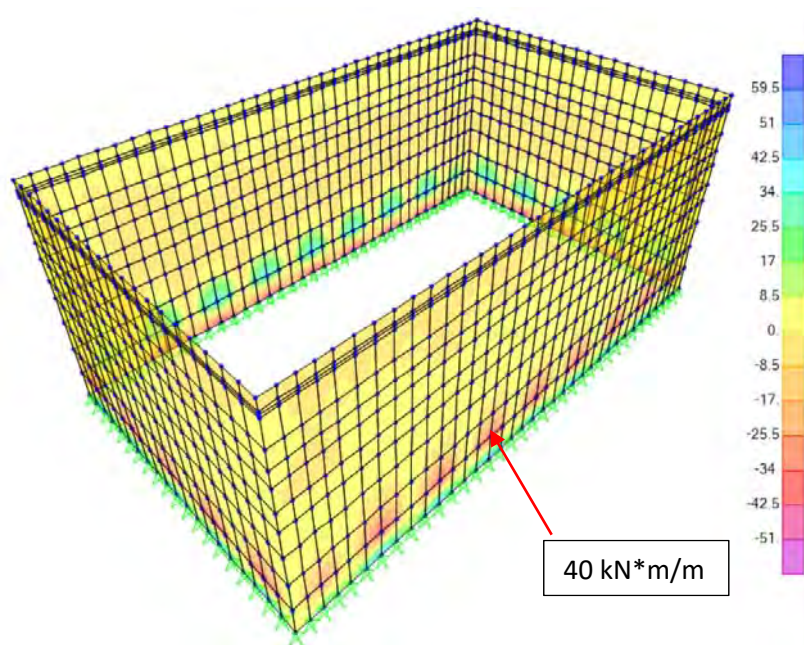


Figura 1 – M22 ELU Flotación

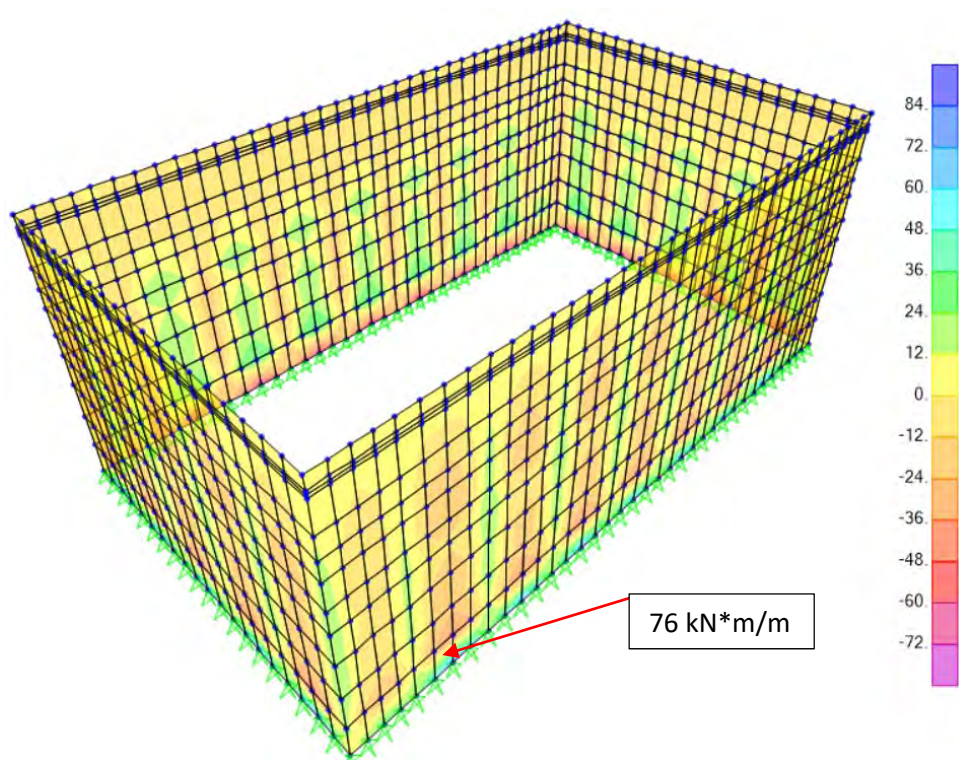


Figura 2 – M22 ELU Fondeo

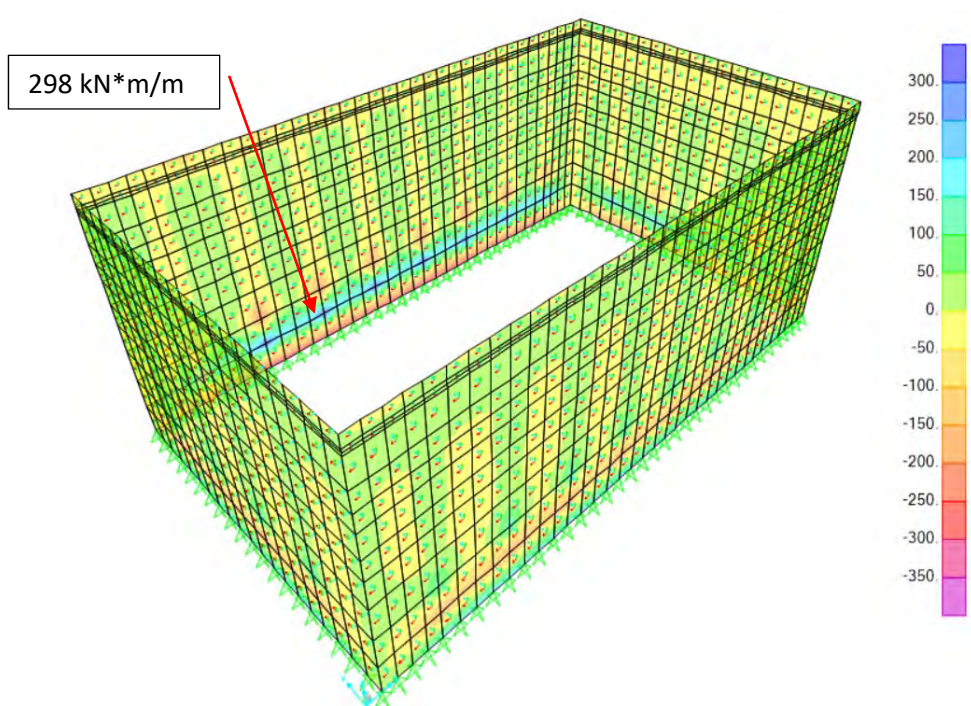


Figura 3 – M22 ELU Cresta de la ola



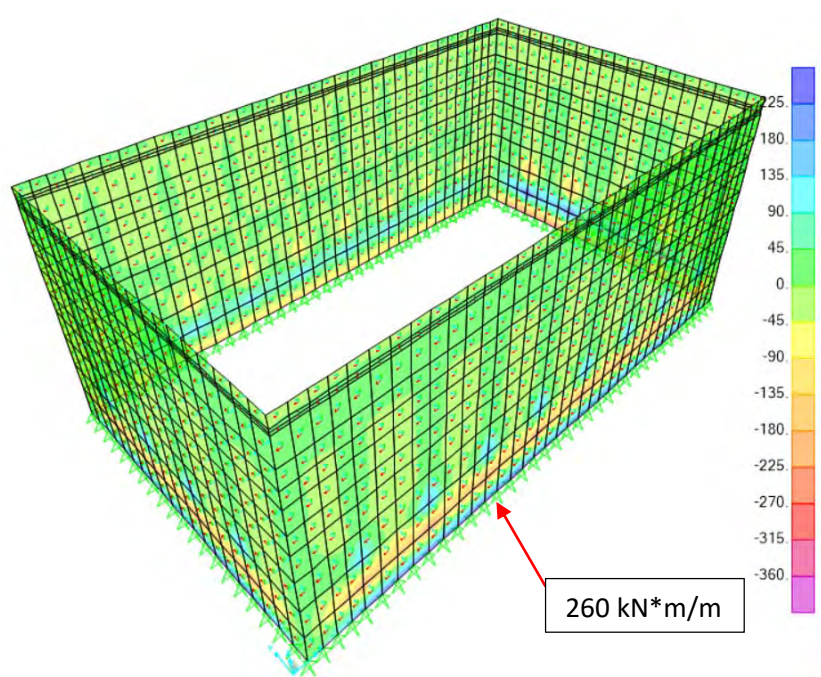


Figura 4 – M22 ELU Seno de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje vertical:

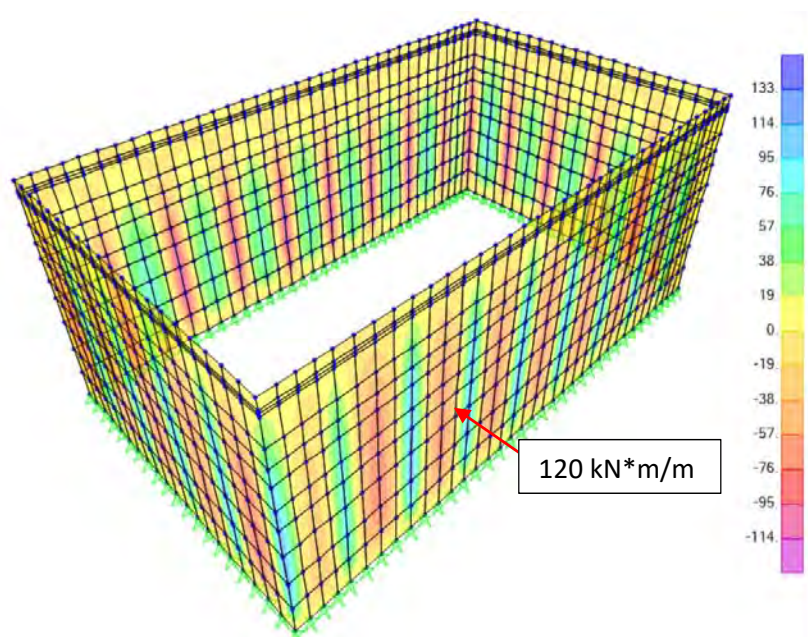


Figura 5 – M11 ELU Fondeo



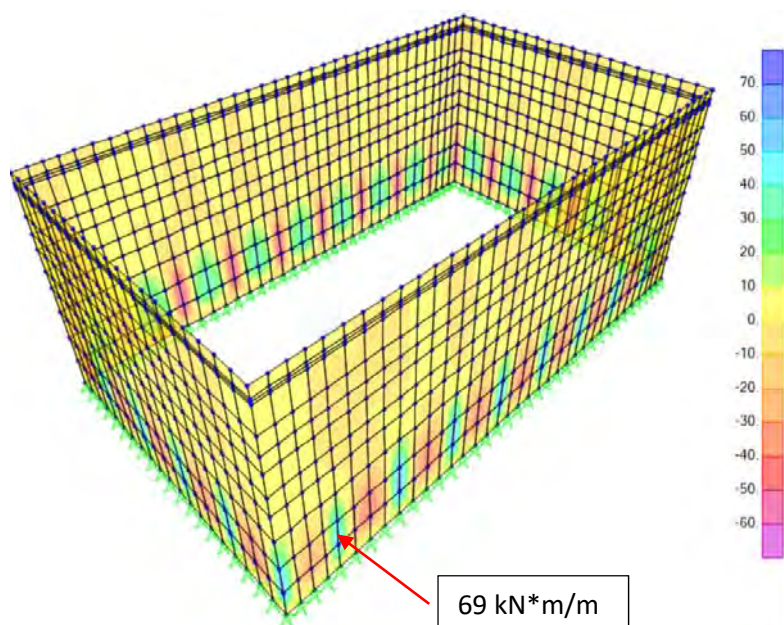


Figura 6 – M11 ELU Flotación

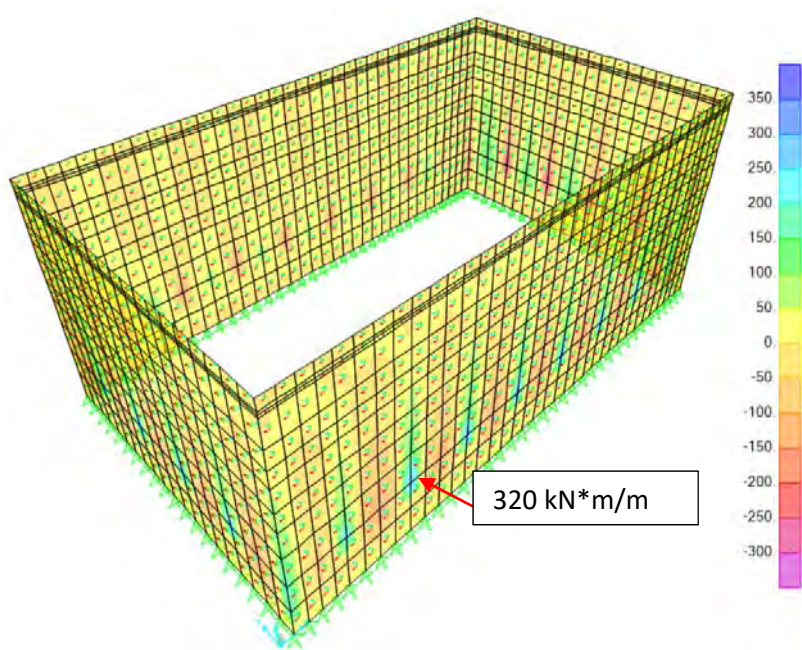


Figura 7 – M11 ELU Seno de la ola

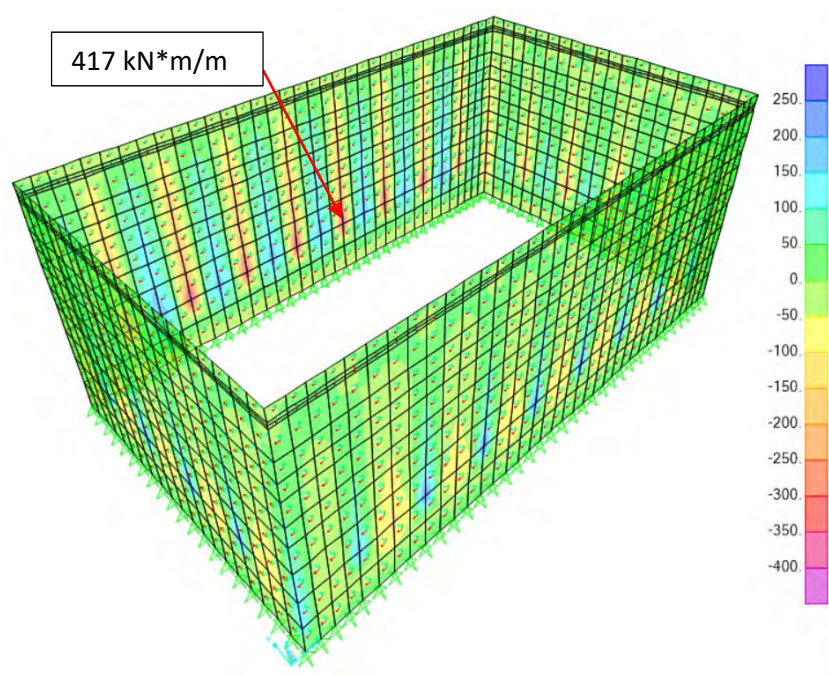


Figura 8 – M11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento torsor M12:

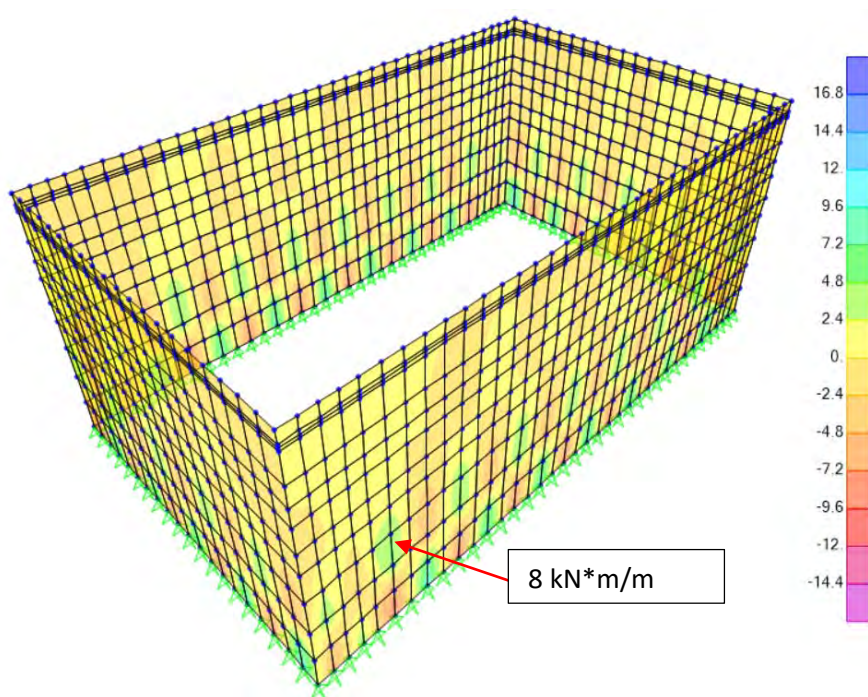


Figura 9 – M12 ELU Flotación



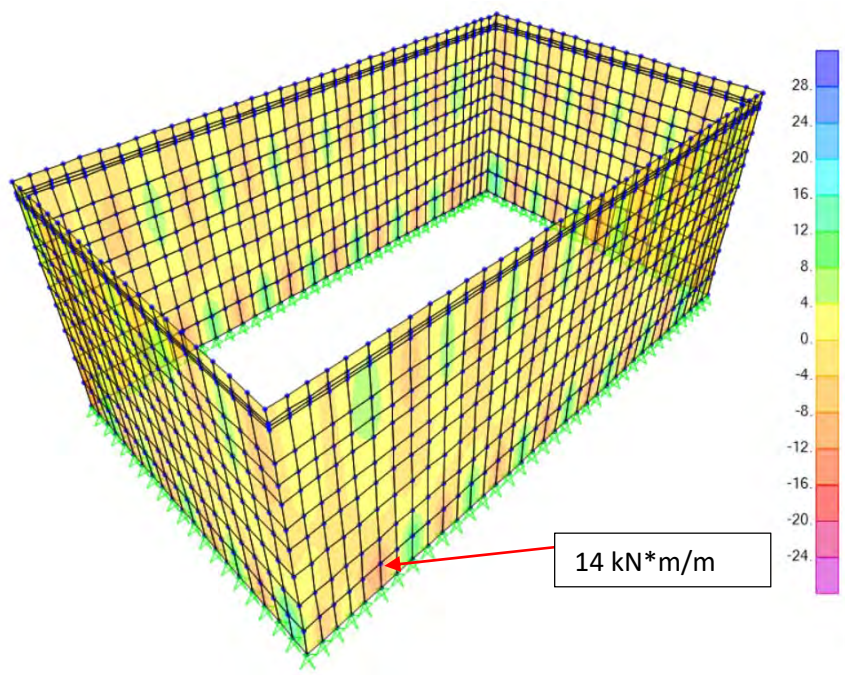


Figura 10 – M12 ELU Fondeo

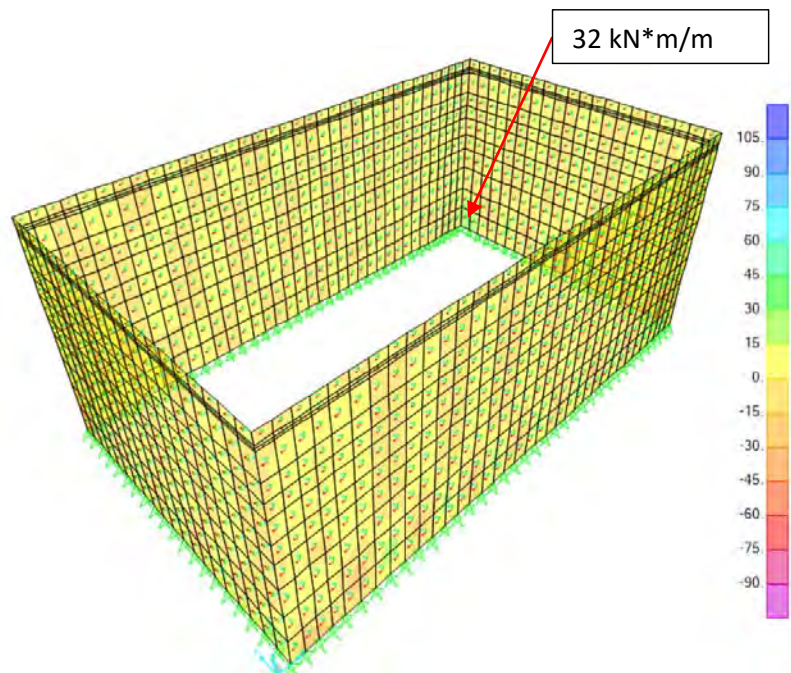


Figura 11 – M12 ELU Seno de la ola

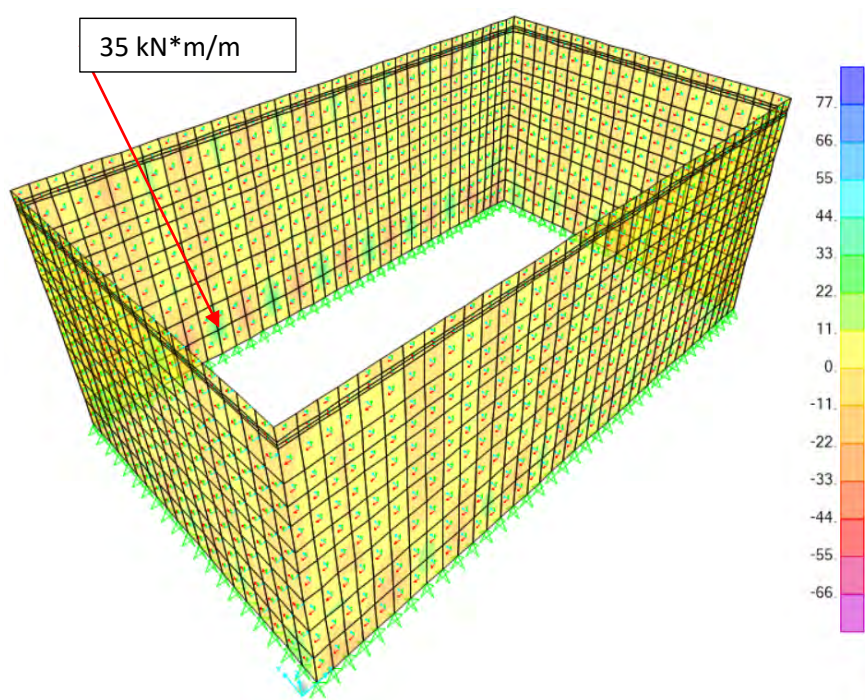


Figura 12 – M12 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje horizontal:

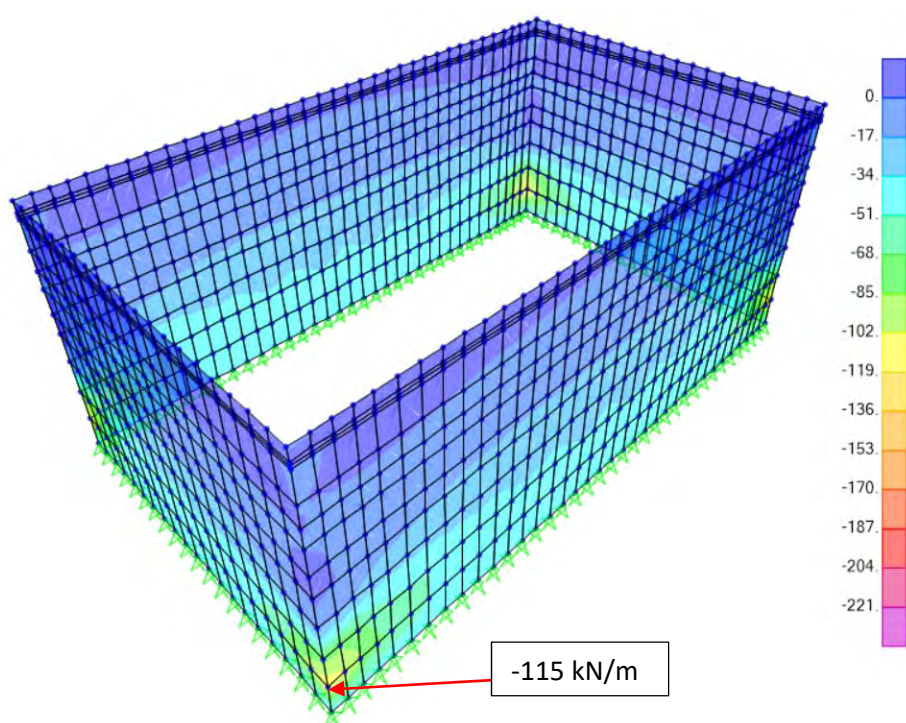


Figura 13 – F11 ELU Flotación



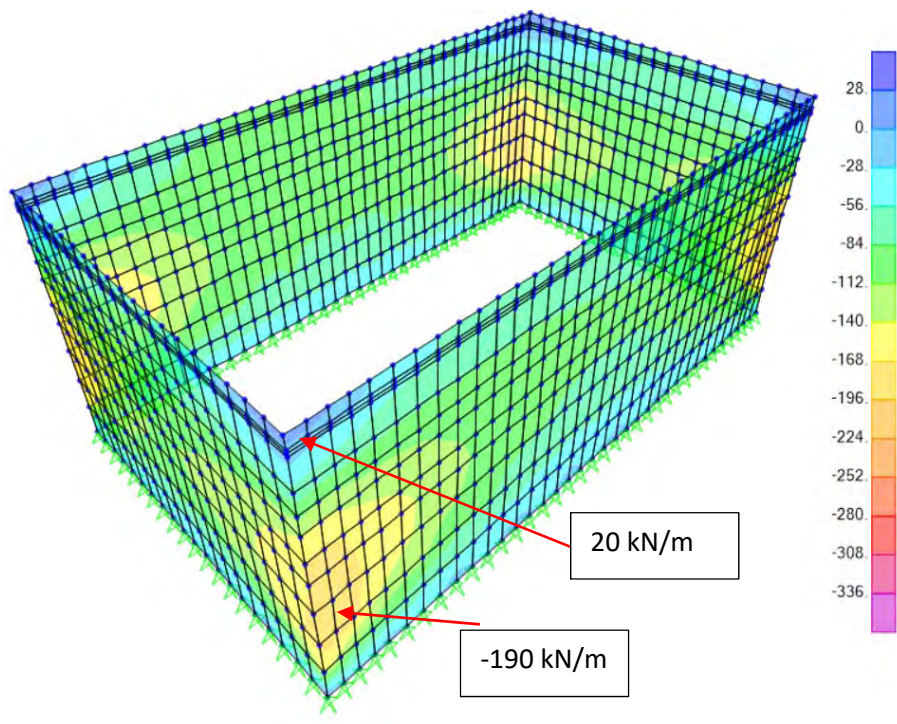


Figura 14 – F11 ELU Fondeo

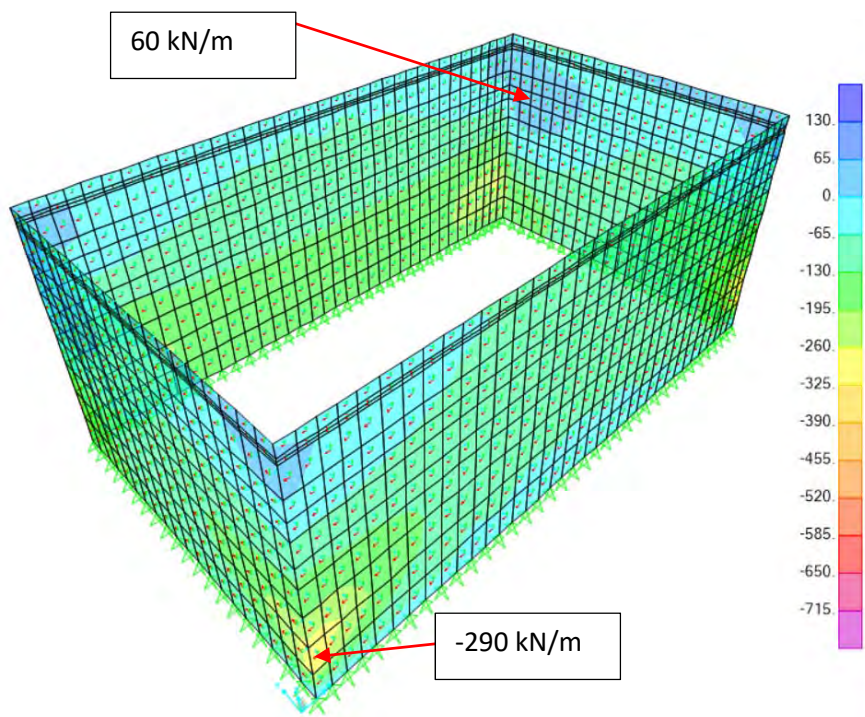


Figura 15 – F11 ELU Seno de la ola

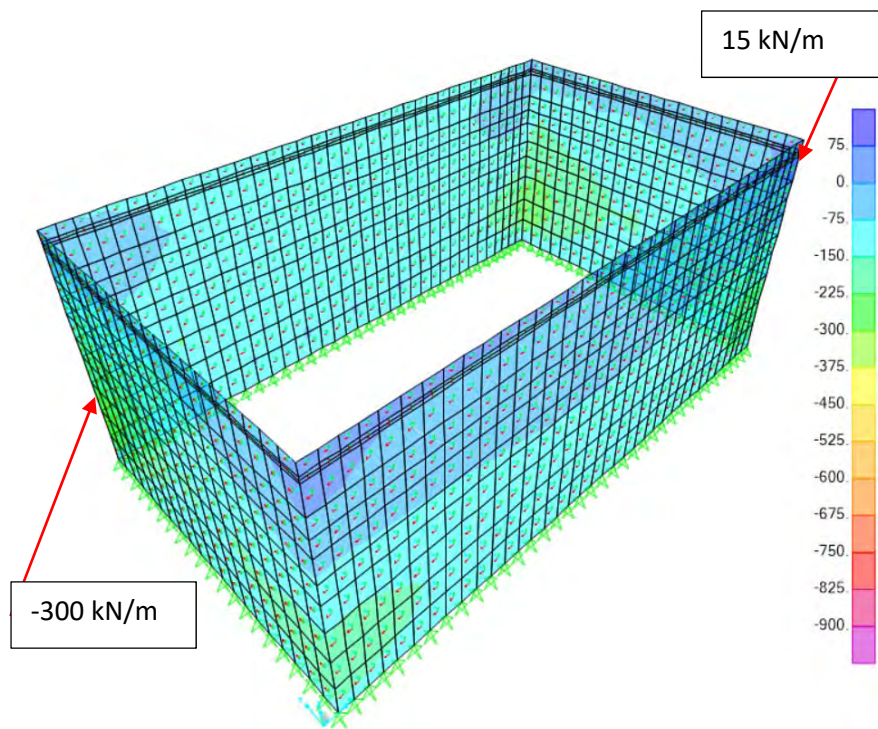


Figura 16 – F11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje vertical:

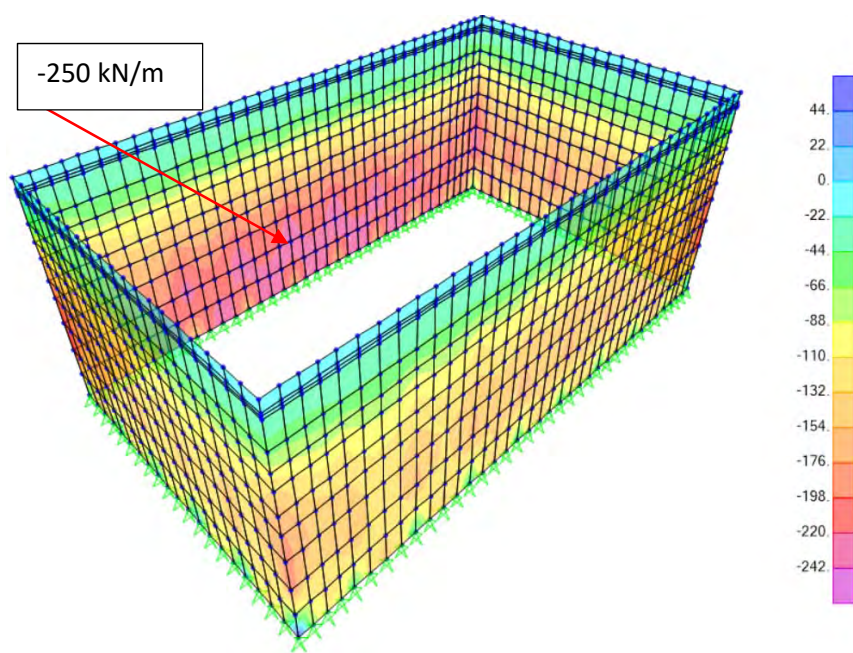


Figura 17 – F22 ELU Fondeo

-240 kN/m



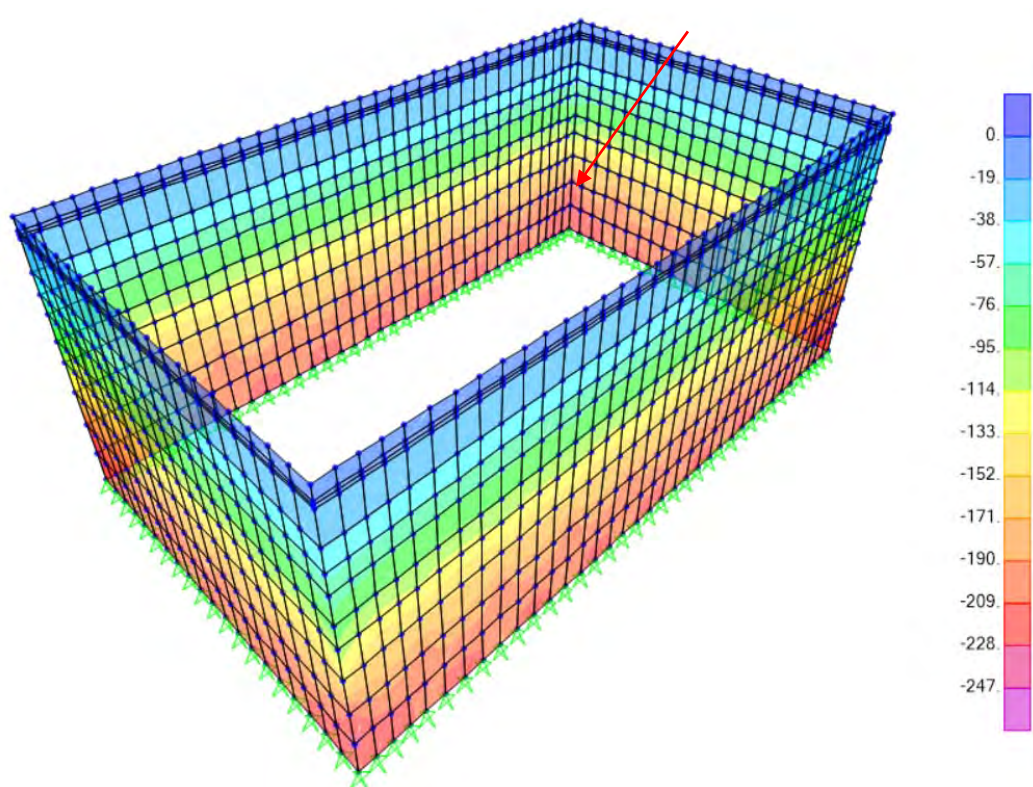


Figura 18 – F22 ELU Flotación

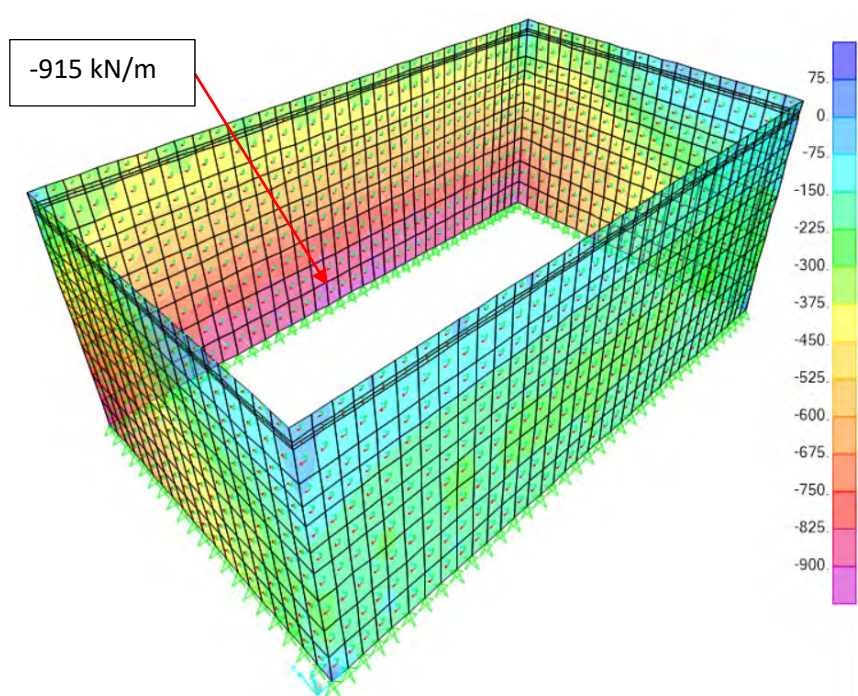


Figura 19 – F22 ELU Seno de la ola

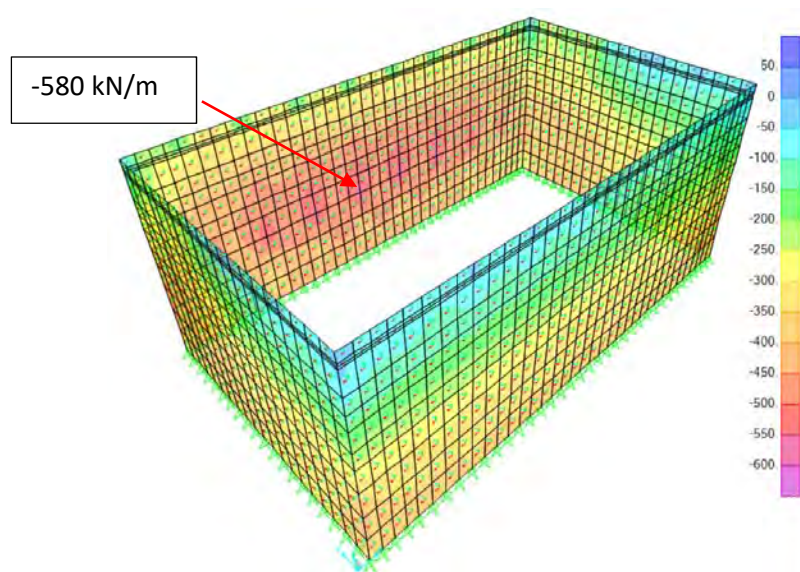


Figura 20 – F22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V13:

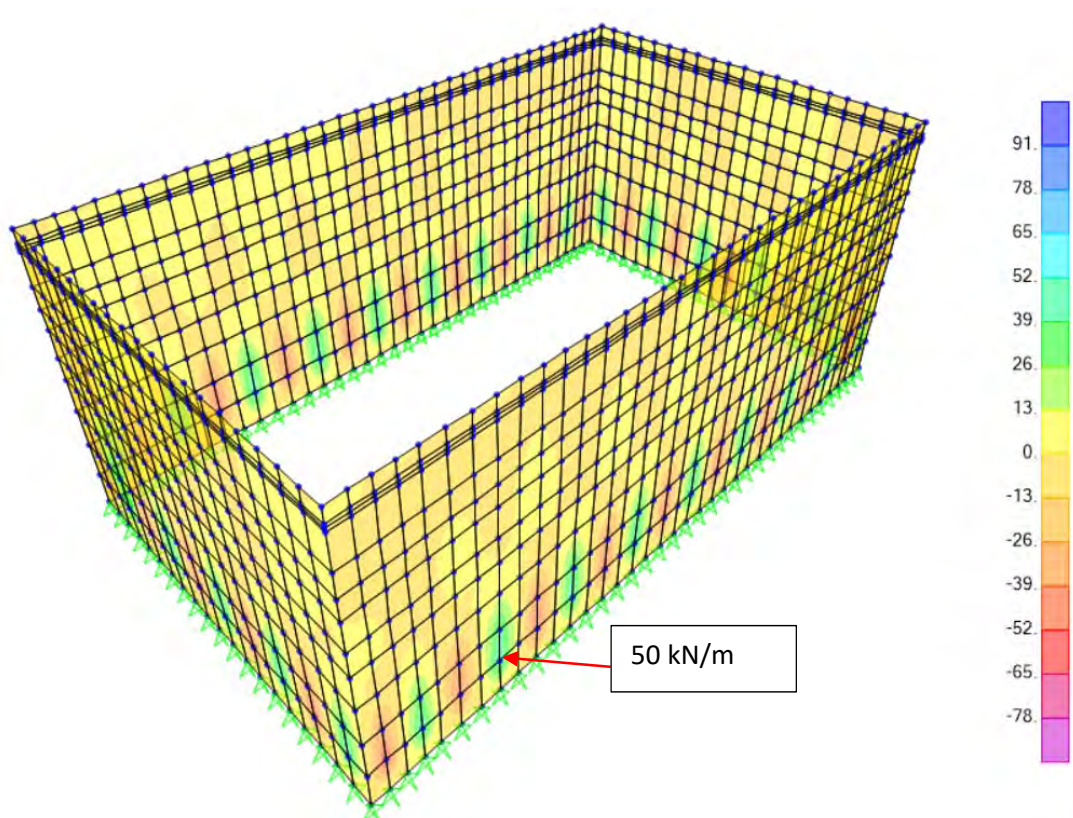


Figura 21 – V13 ELU Flotación



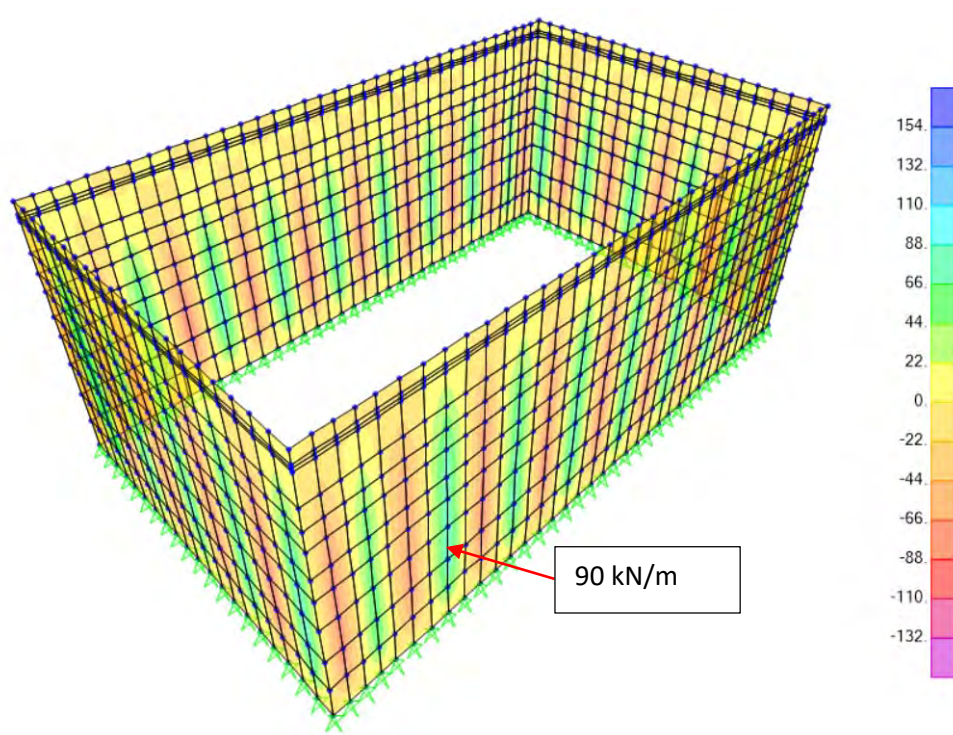


Figura 22 – V13 ELU Fondeo

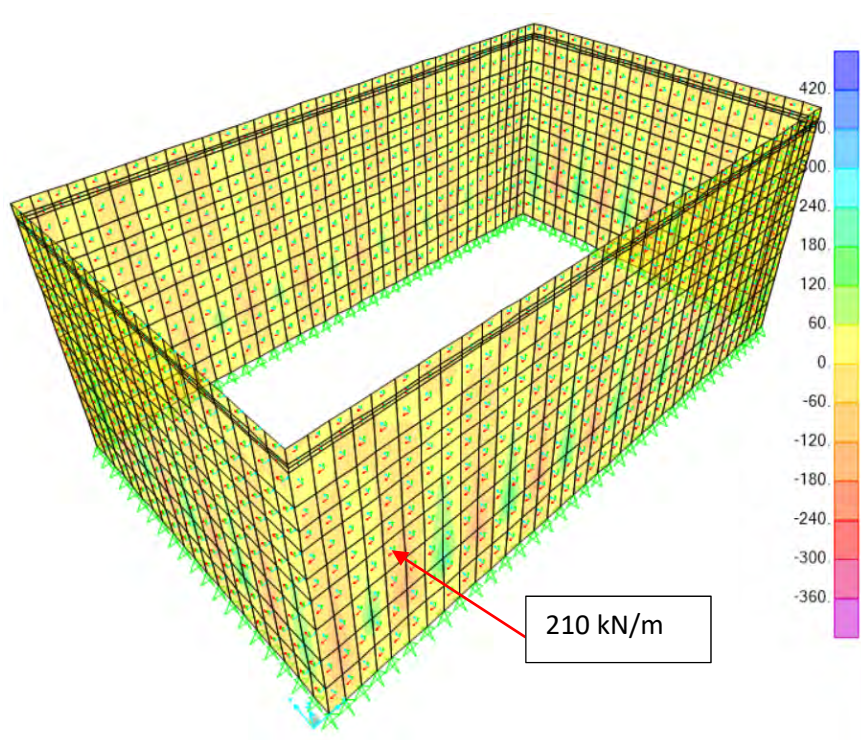


Figura 23 – V13 ELU Seno de la ola

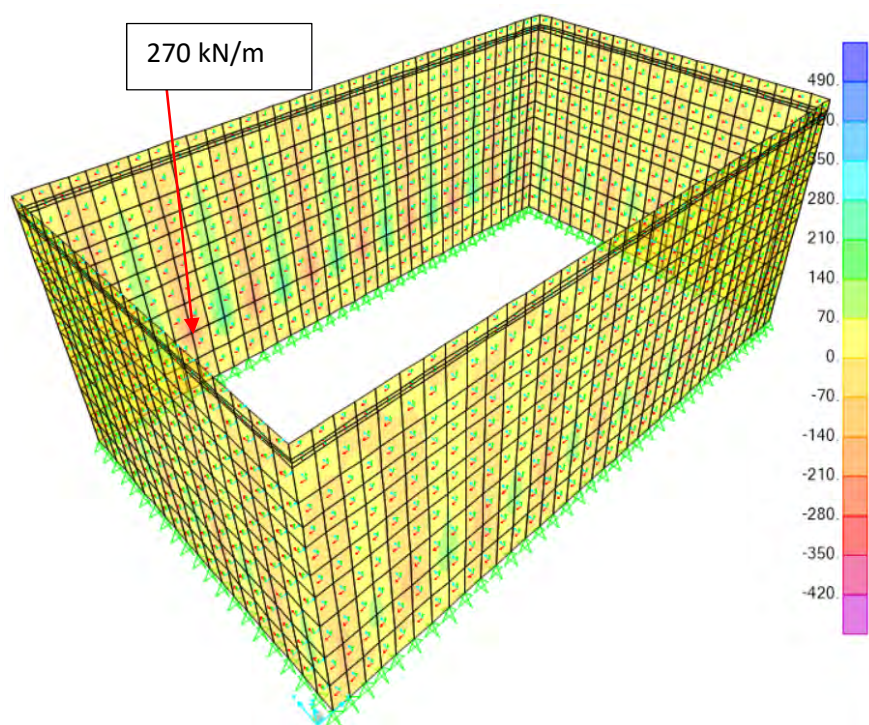


Figura 24 – V13 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V23:

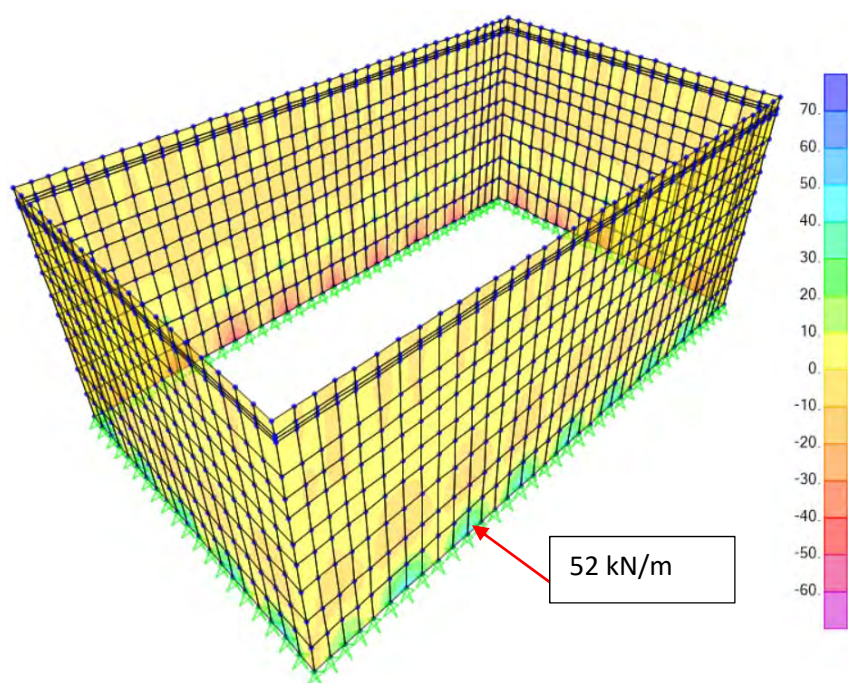


Figura 25 – V23 ELU Flotación



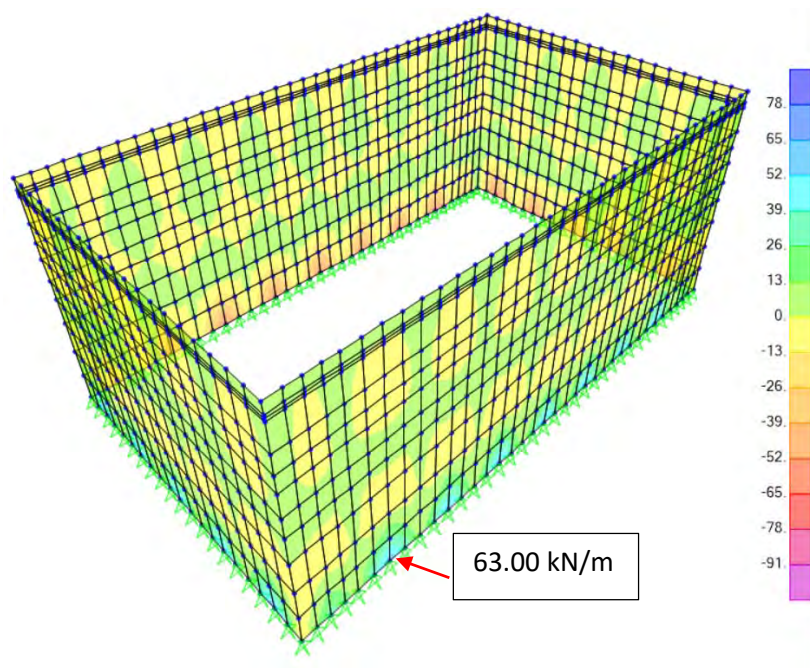


Figura 26 – V23 ELU Fondo

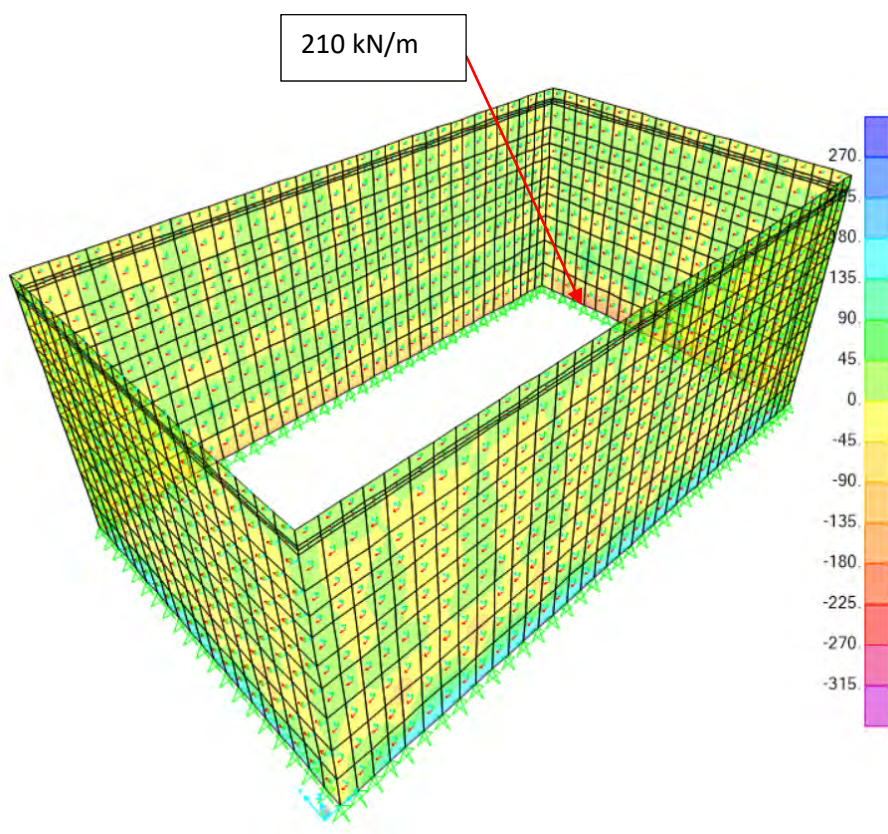


Figura 27 – V23 ELU Seno de la ola

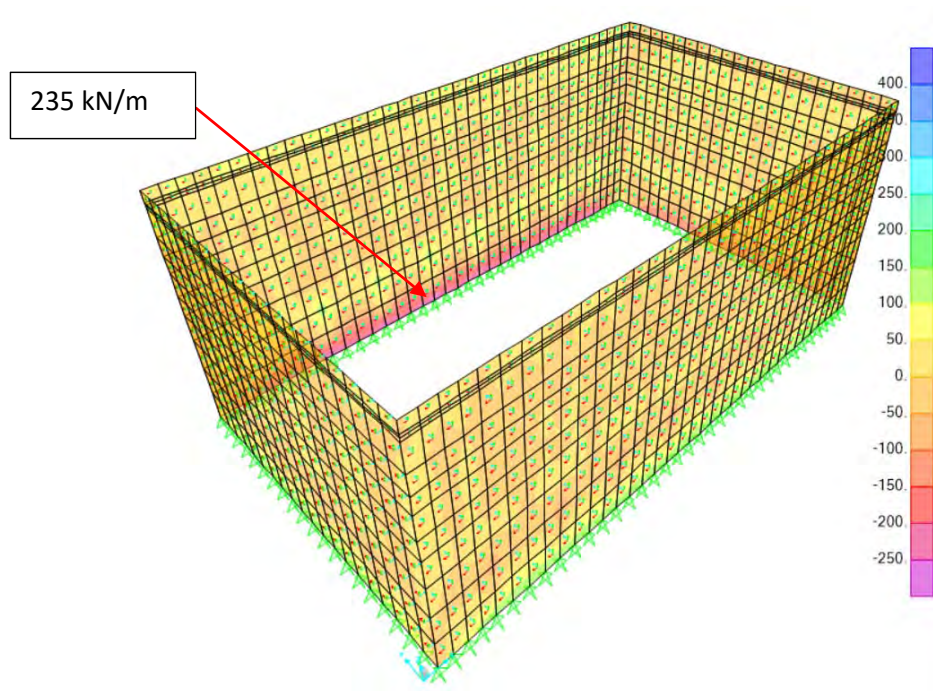


Figura 28 – V23 ELU Cresta de la ola

#### 1.1.2. Paredes interiores

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje horizontal:

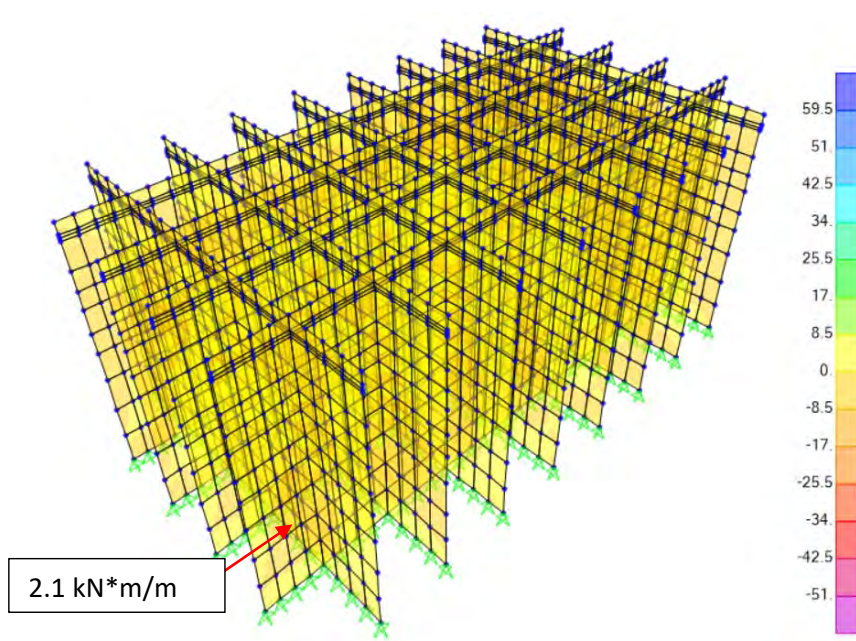


Figura 29 – M22 ELU Flotación



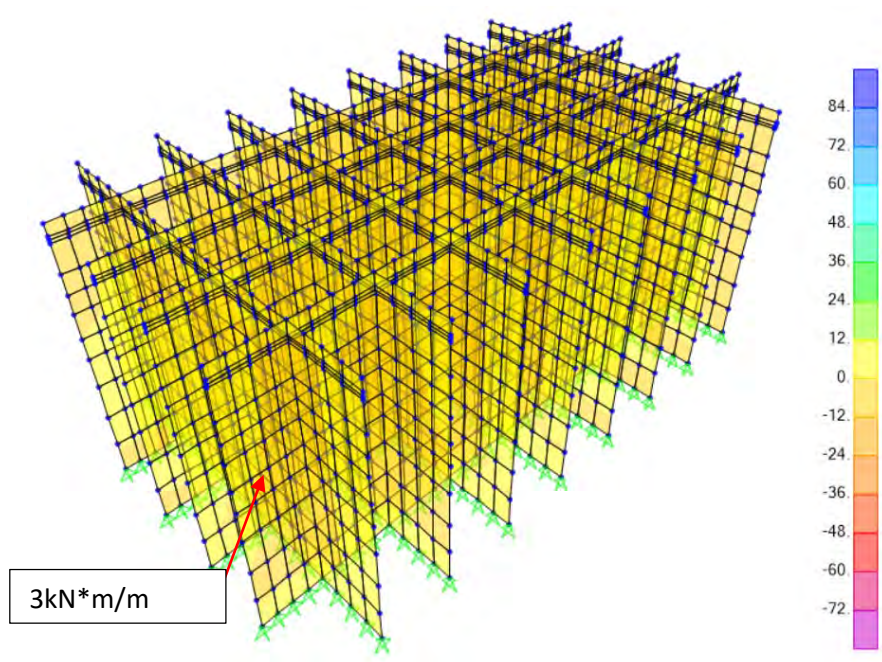


Figura 30 – M22 ELU Fondeo

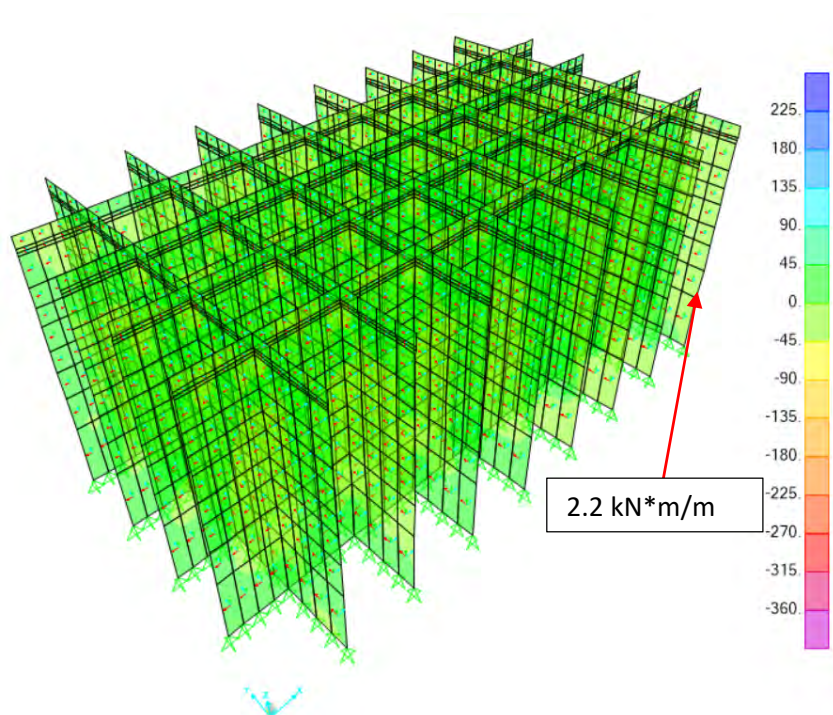


Figura 31 – M22 ELU Seno de la ola

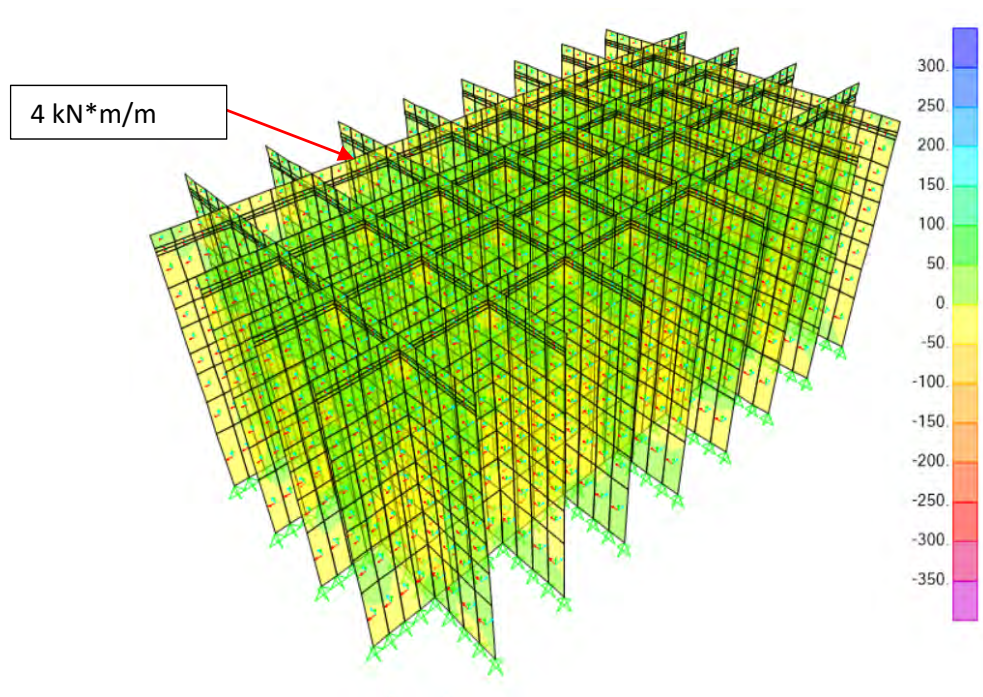


Figura 32 – M22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje vertical:

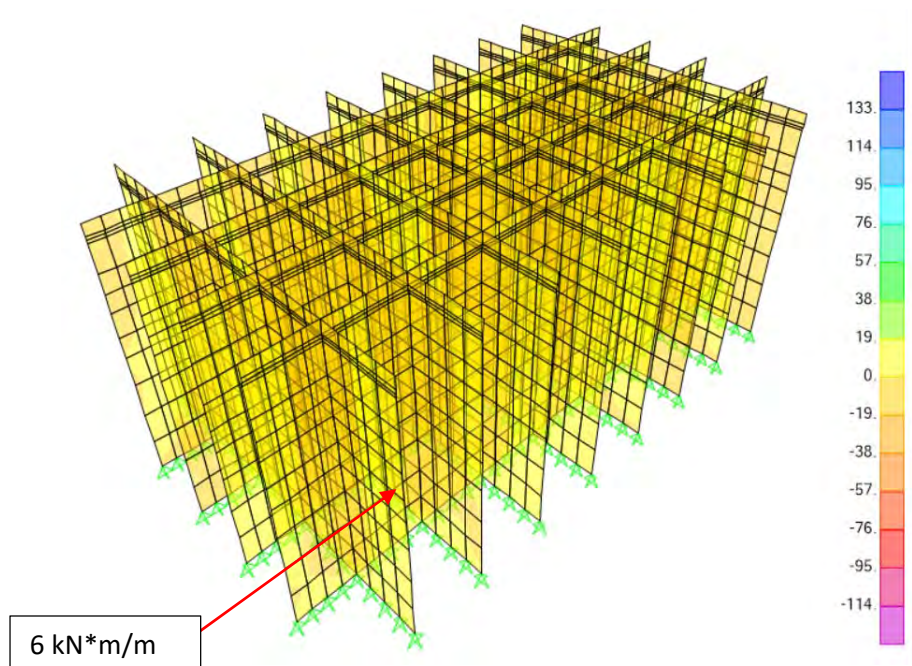


Figura 33 – M11 ELU Fondeo



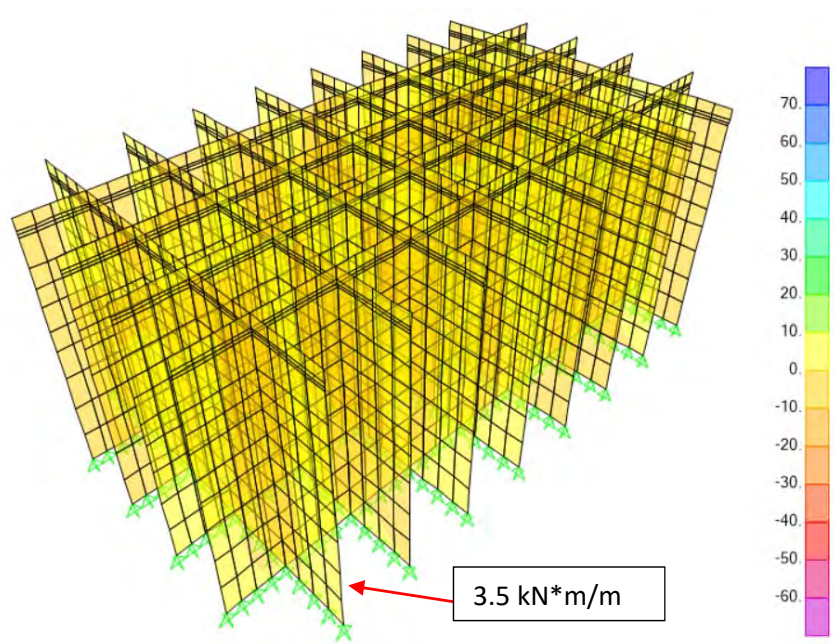


Figura 34 – M11 ELU Flotación

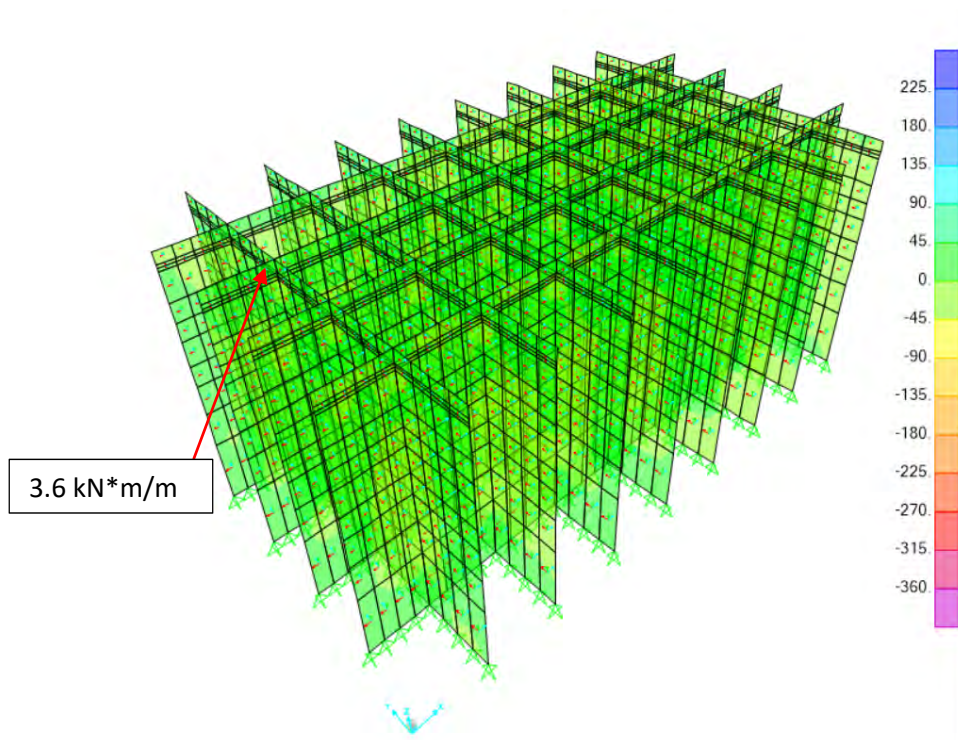


Figura 35 – M11 ELU Seno de la ola

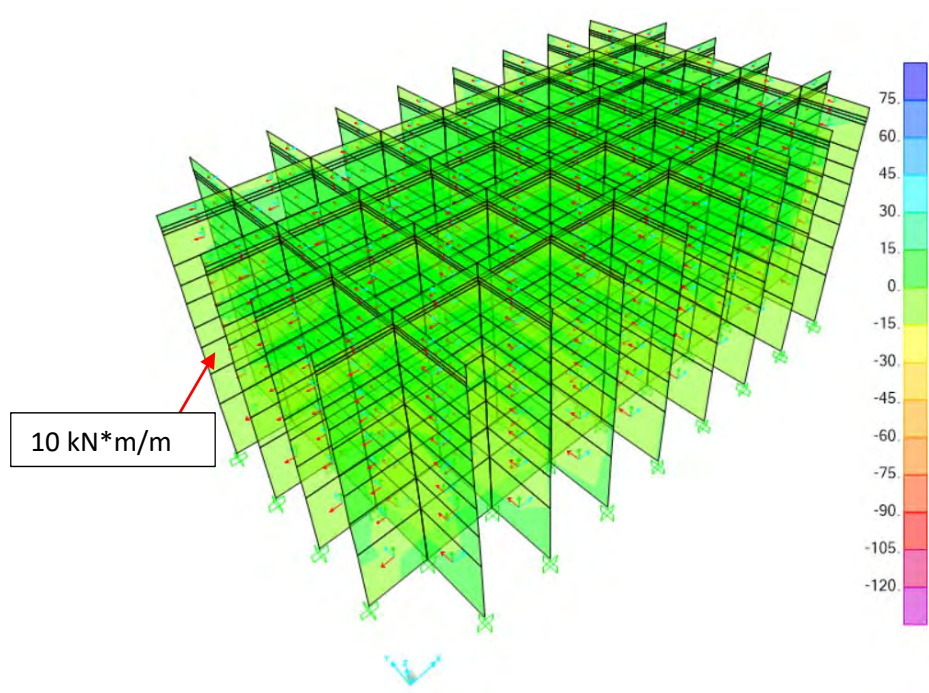


Figura 36 – M11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento torsor M12:

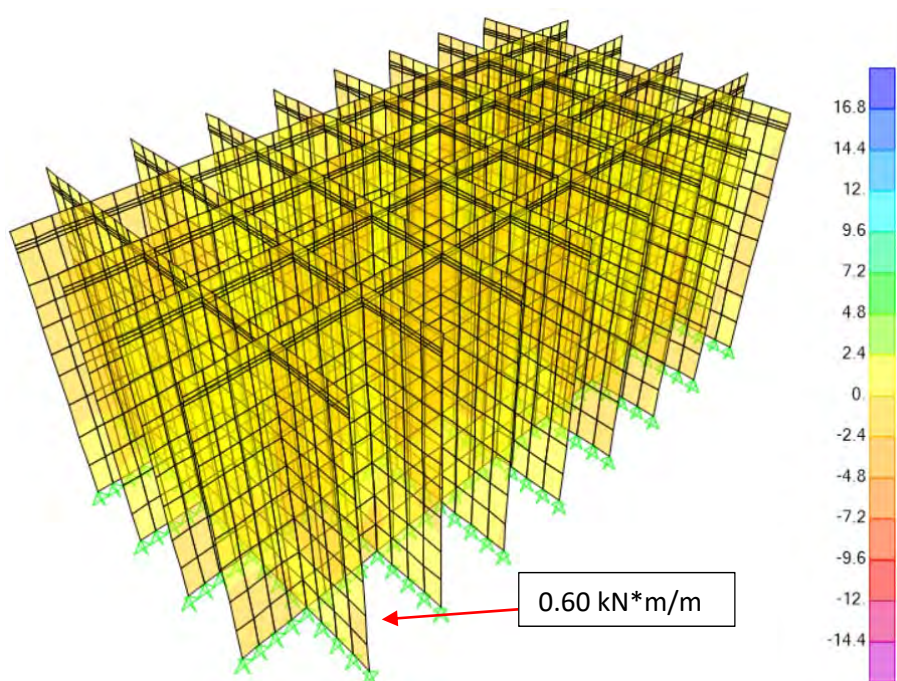


Figura 37 – M12 ELU Flotación



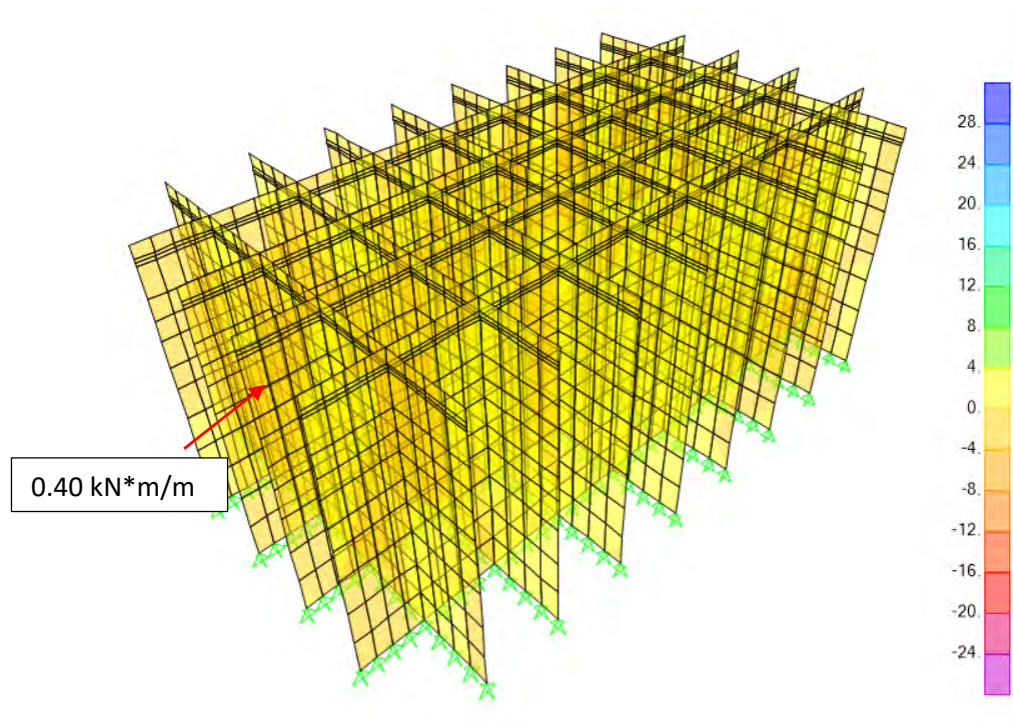


Figura 38 – M12 ELU Fondeo

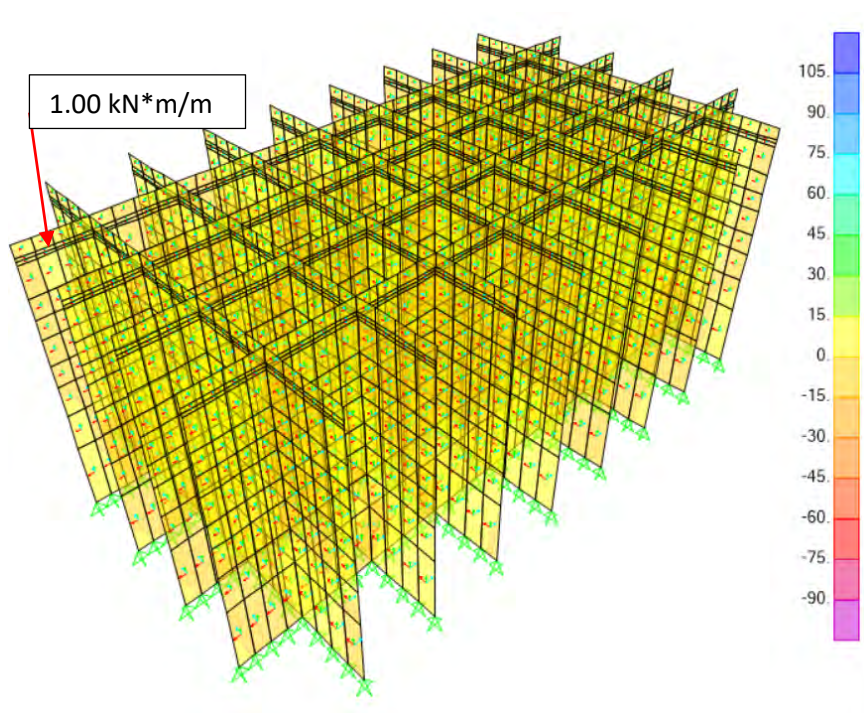


Figura 39 – M12 ELU Seno de la ola

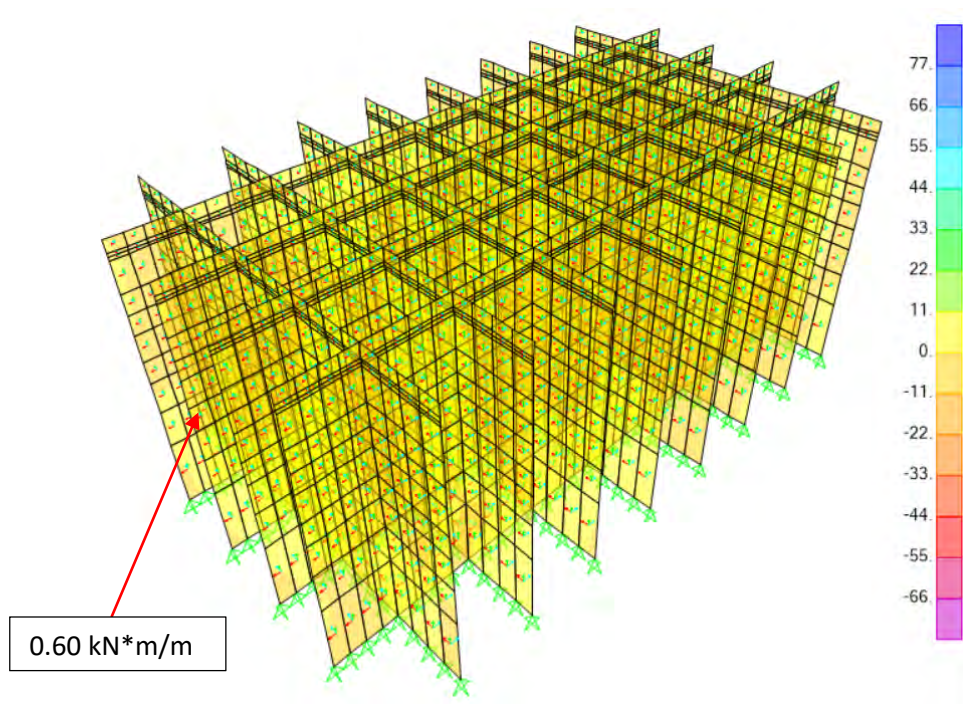


Figura 40 – M12 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje horizontal:

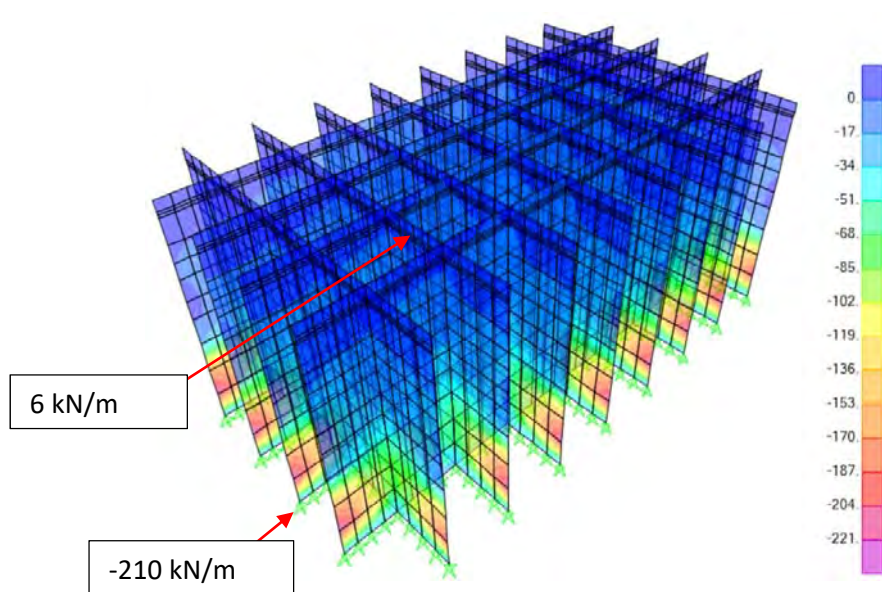


Figura 41 – F11 ELU Flotación



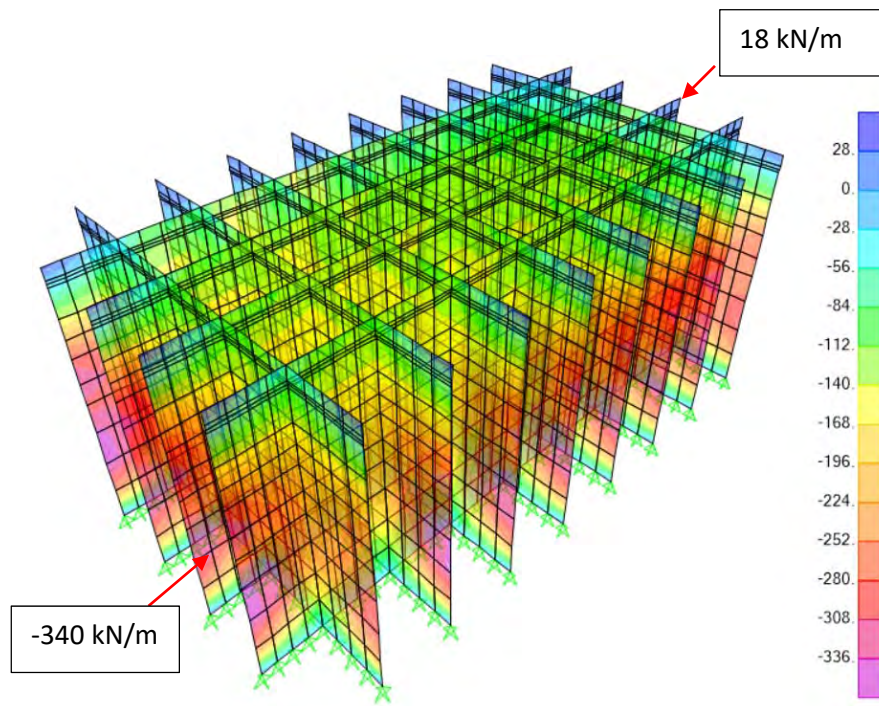


Figura 42 – F11 ELU Fondeo

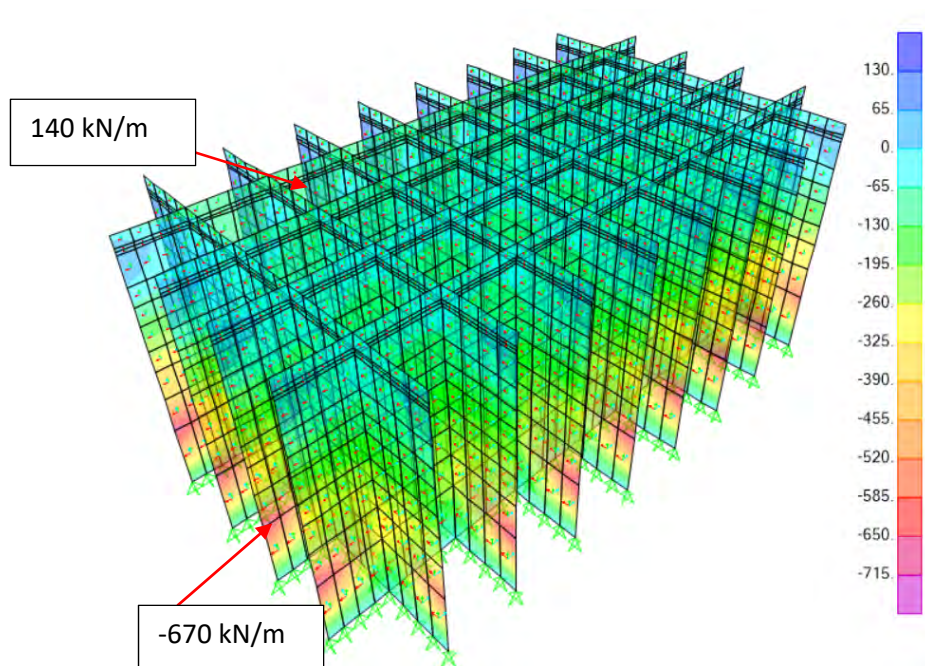


Figura 43 – F11 ELU Seno de la ola

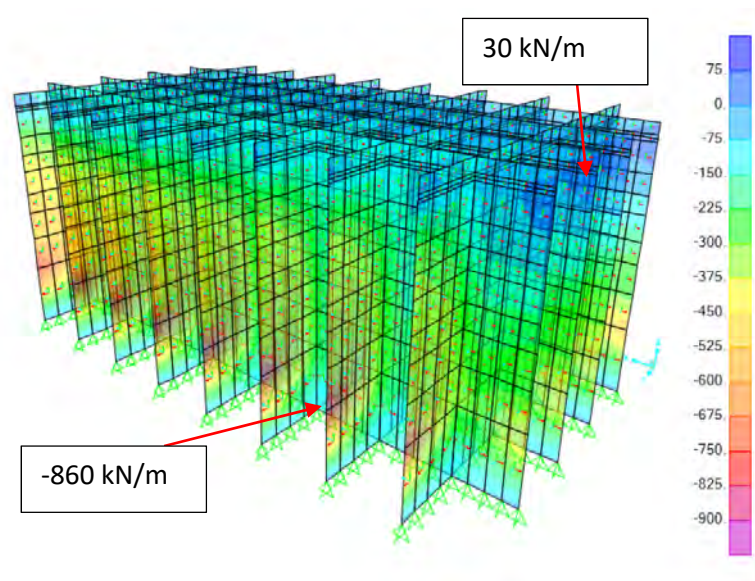


Figura 44 – F11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje vertical:

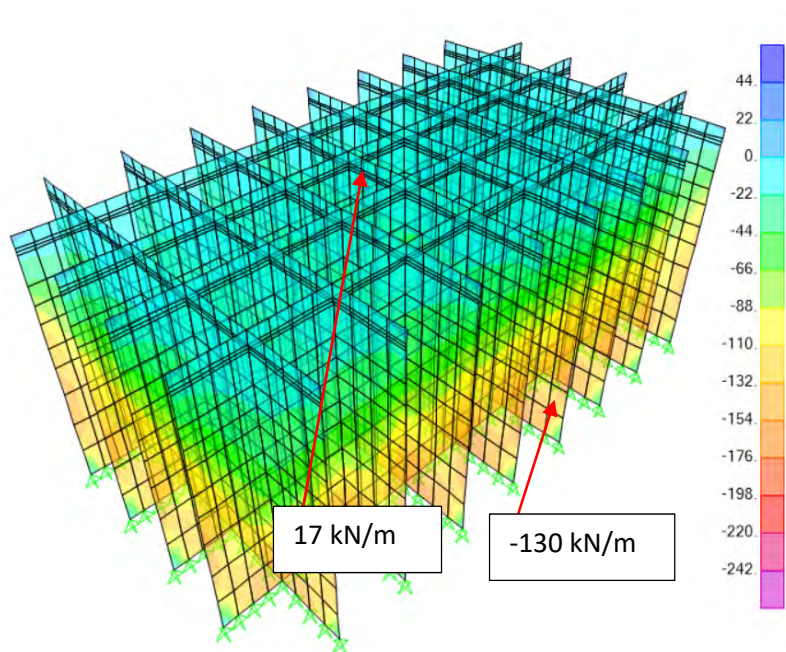


Figura 45 – F22 ELU Fondeo



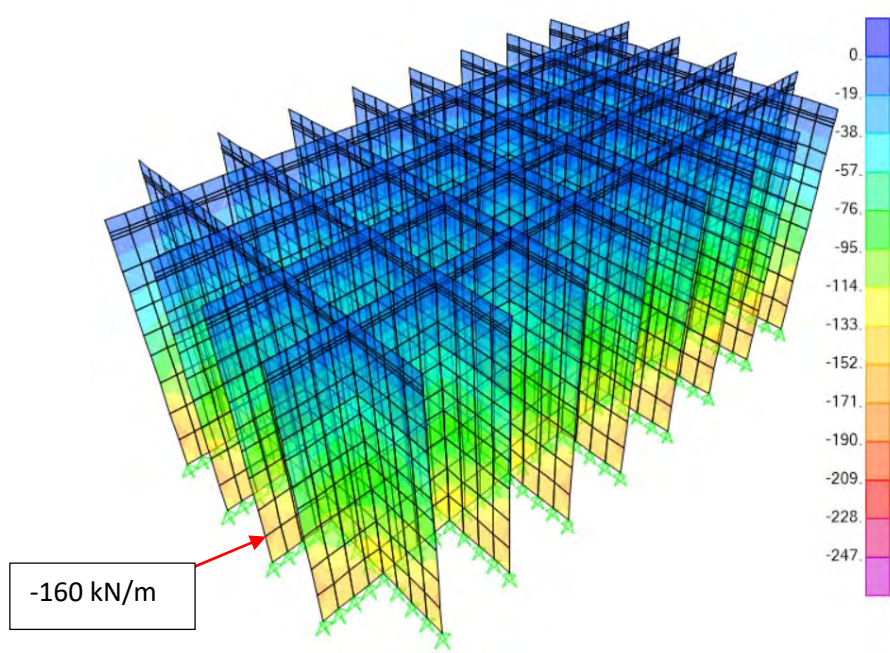


Figura 46 – F22 ELU Flotación

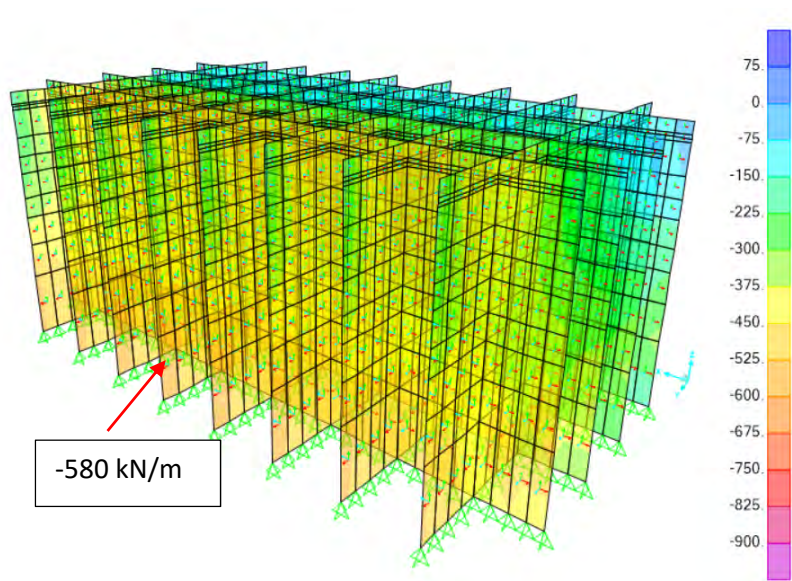


Figura 47 – F22 ELU Seno de la ola

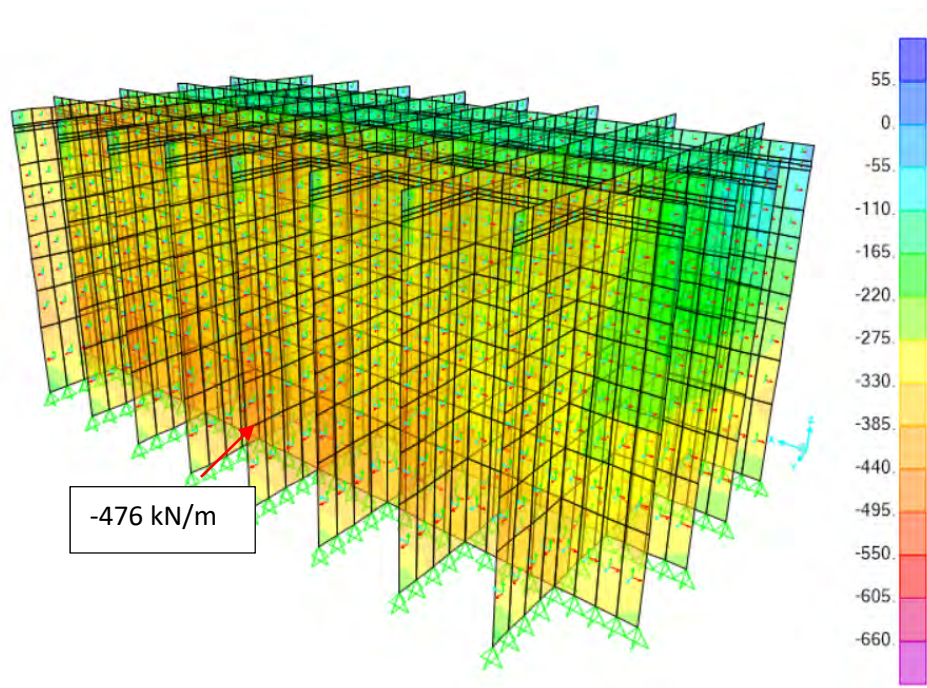


Figura 48 – F22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del cortante V13:

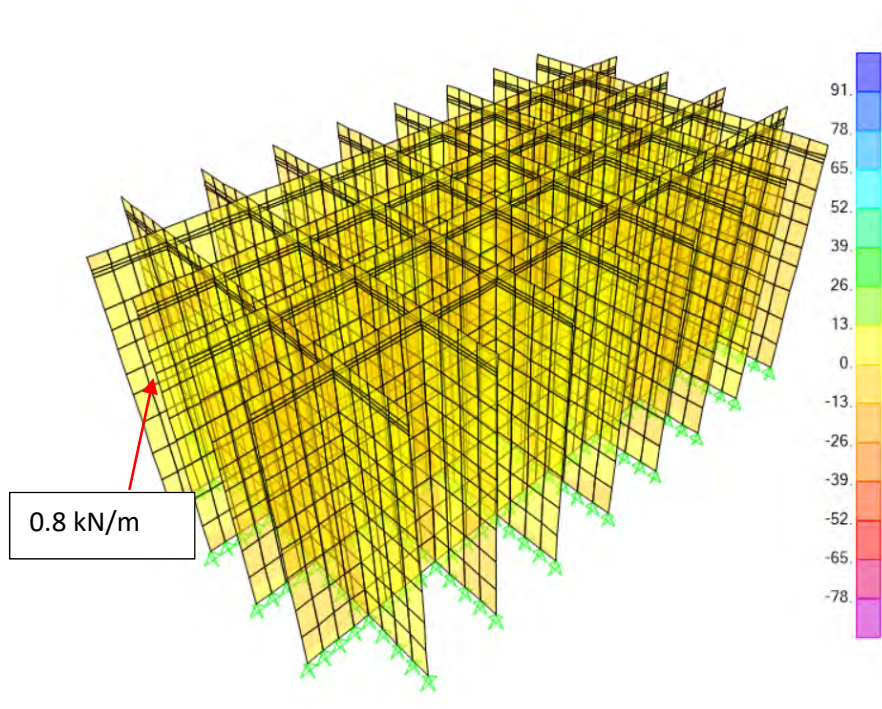


Figura 49 – V13 ELU Flotación



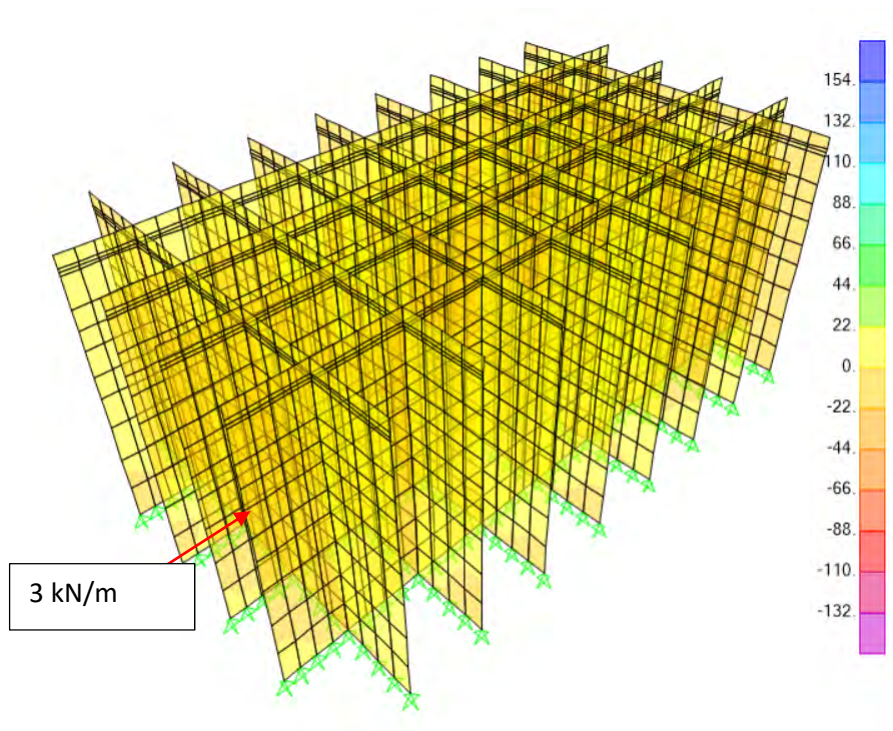


Figura 50 – V13 ELU Fondeo

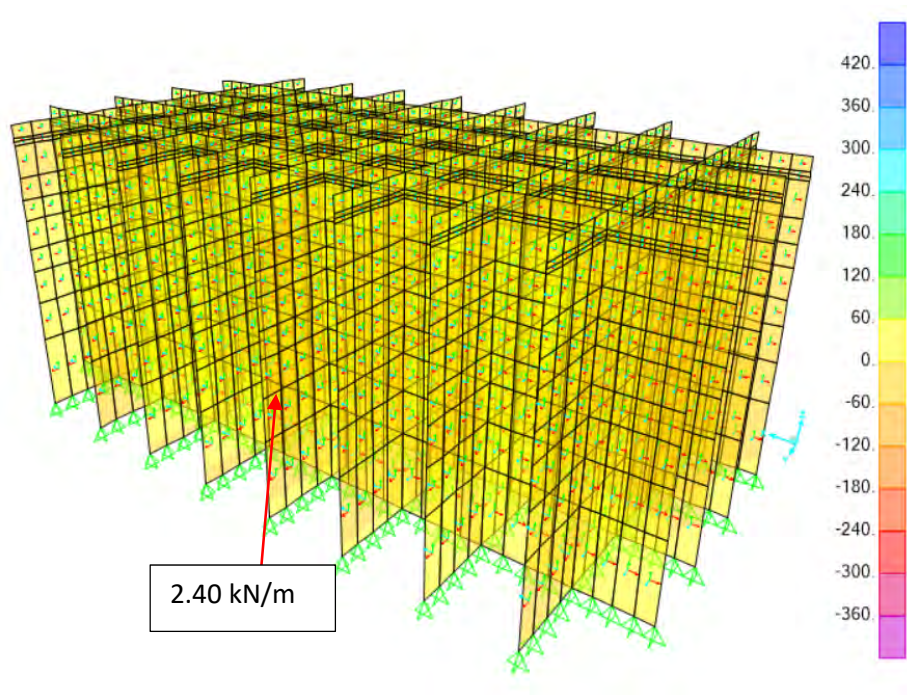


Figura 51 – V13 ELU Seno de la ola

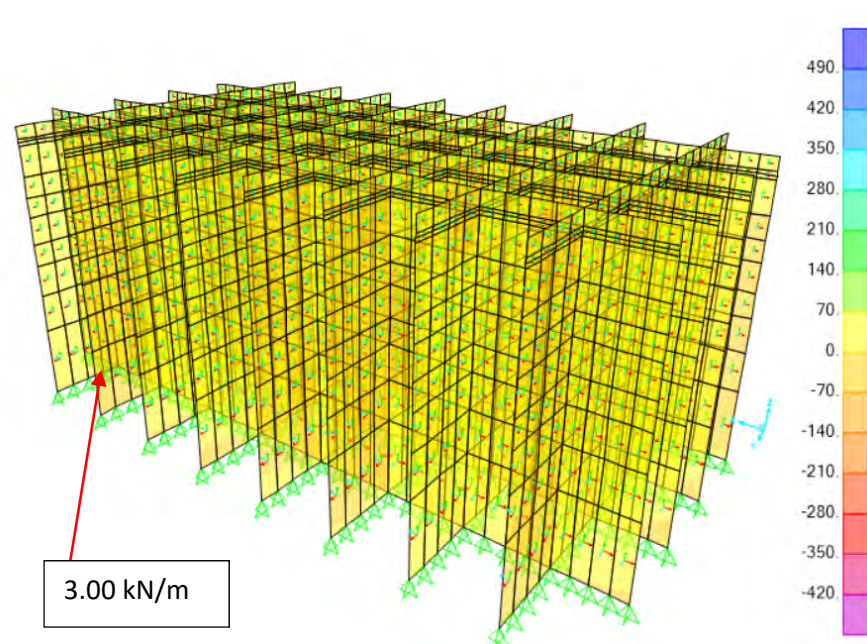


Figura 52 – V13 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del cortante V23:

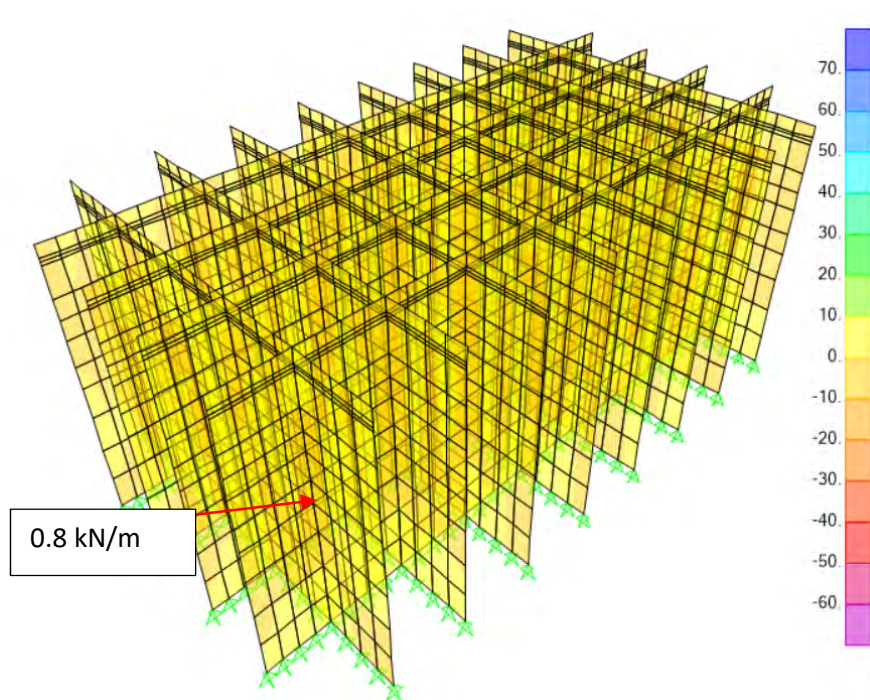


Figura 53 – V23 ELU Flotación



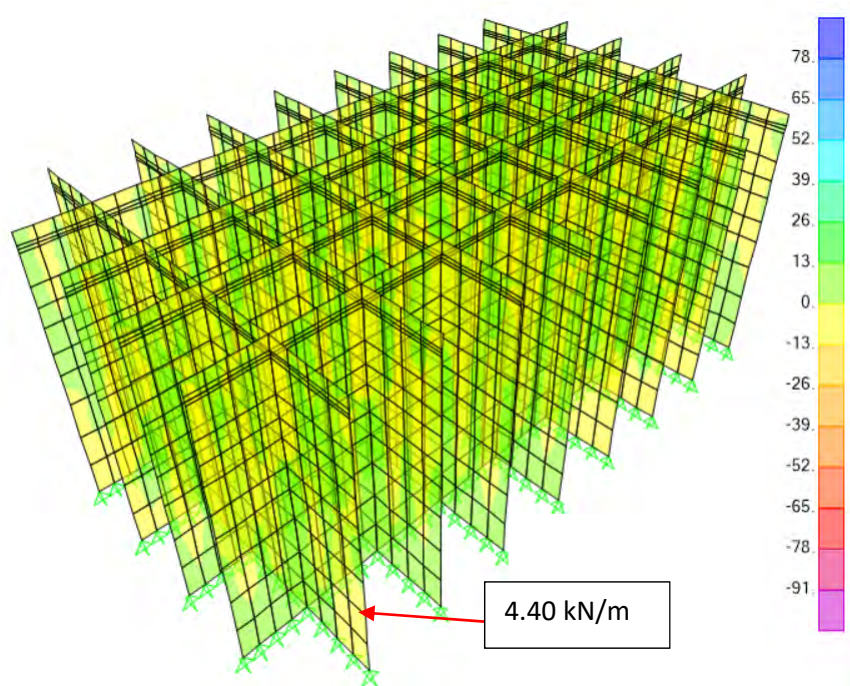


Figura 54 – V23 ELU Fondeo

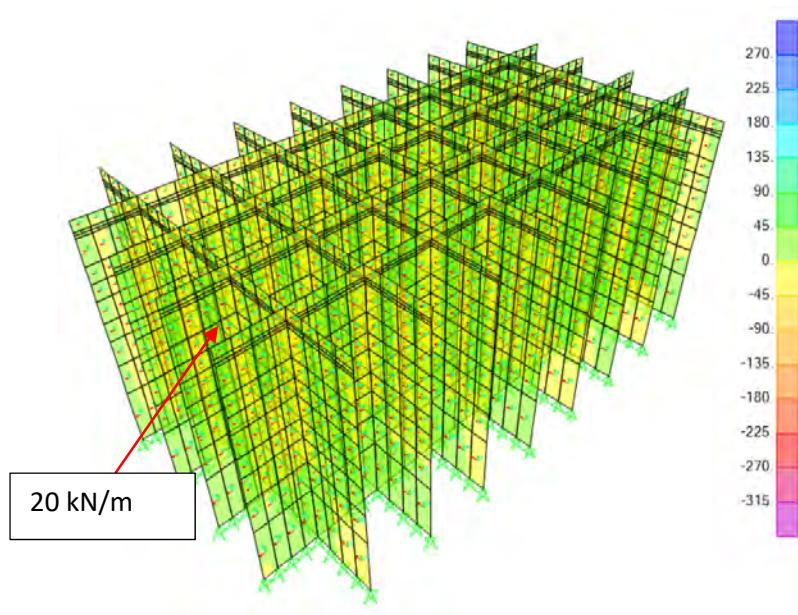


Figura 55 – V23 ELU Seno de la ola

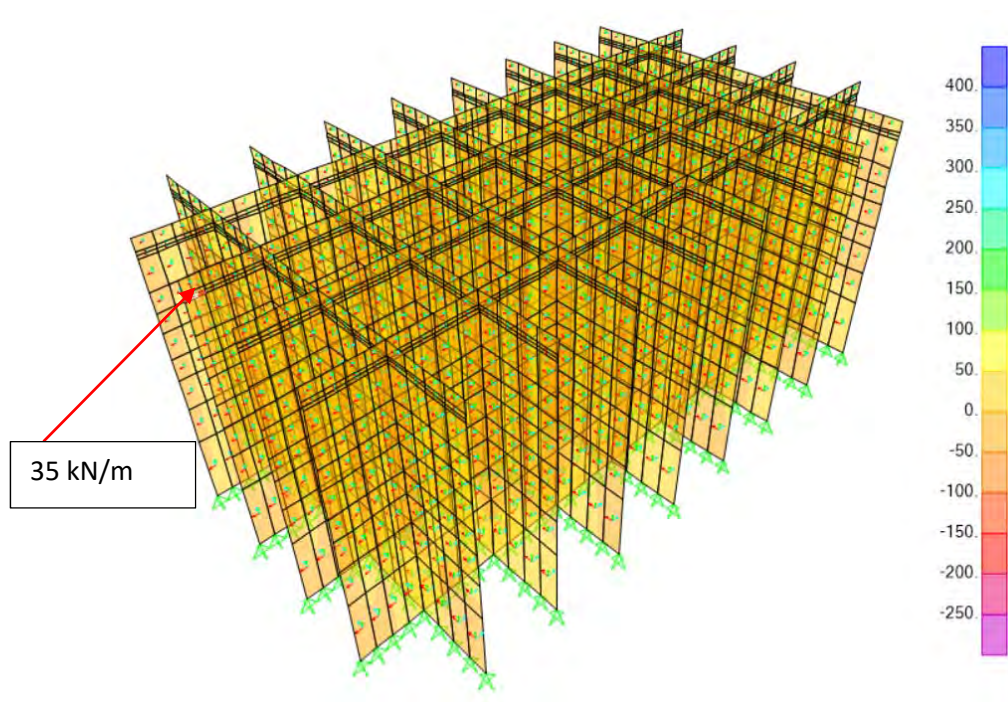


Figura 56 – V23 ELU Cresta de la ola

### 1.1.3. Resumen ELU celdas rectangulares

Paredes exteriores							
	M22 (kN*m/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	F11 (kN/m)	F22 (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)
ELU Flotación	40	69	8	-115	-258.3	50	52
ELU Fondeo	76	120	14	20/-190	-240	90	63
ELU Cresta de la ola	298	417	35	15/-300	-580	270	235
ELU Seno de la ola	260	320	32	60/-290	-915	210	210

Paredes interiores							
	M22 (kN*m/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	F11 (kN/m)	F22 (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)
ELU Flotación	2.1	3.5	0.6	6/-210	-160	0.8	0.8
ELU Fondeo	3	6	0.4	18/-340	17/-130	3	4.4
ELU Cresta de la ola	4	10	0.6	30/-860	-476	3	35
ELU Seno de la ola	2.2	3.6	1	140/-670	-580	2.4	20

## 1.2. ELS

### 1.2.1. Paredes exteriores

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje horizontal:

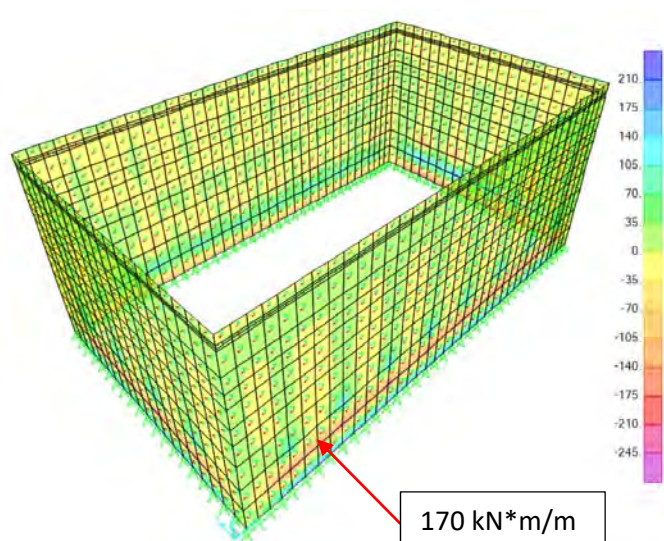


Figura 57 – M22 ELS Seno de la ola

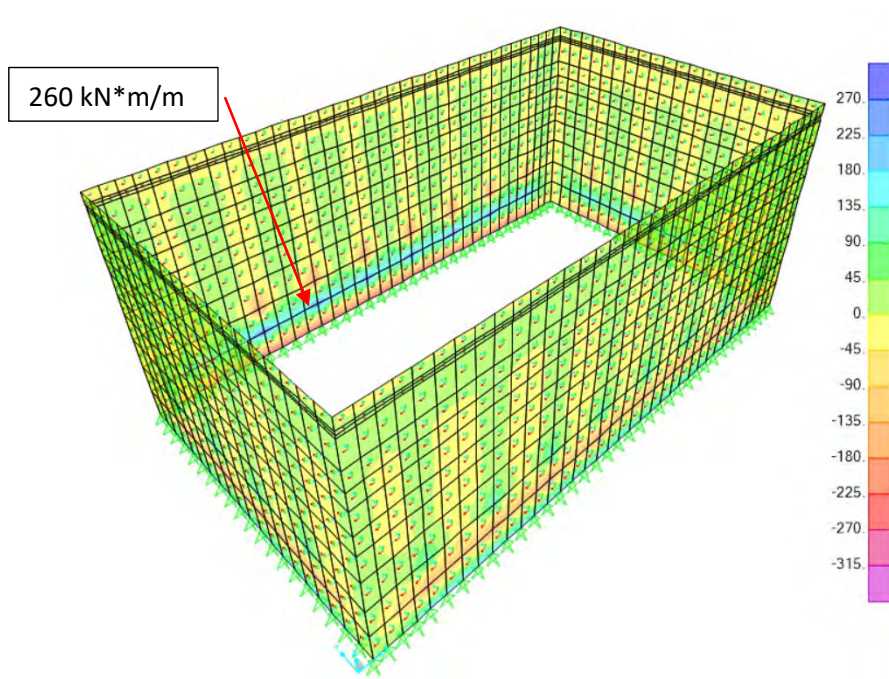


Figura 58 – M22 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje vertical:

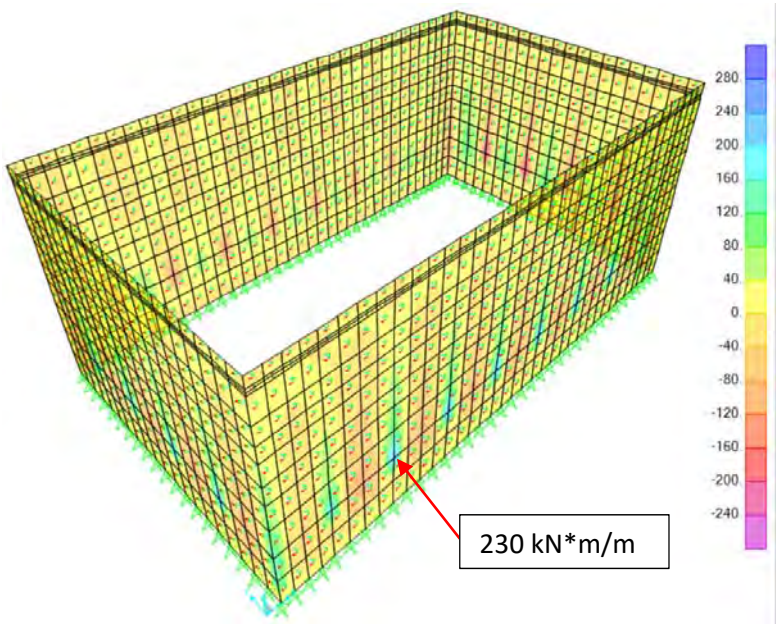


Figura 59 – M11 ELS Seno de la ola

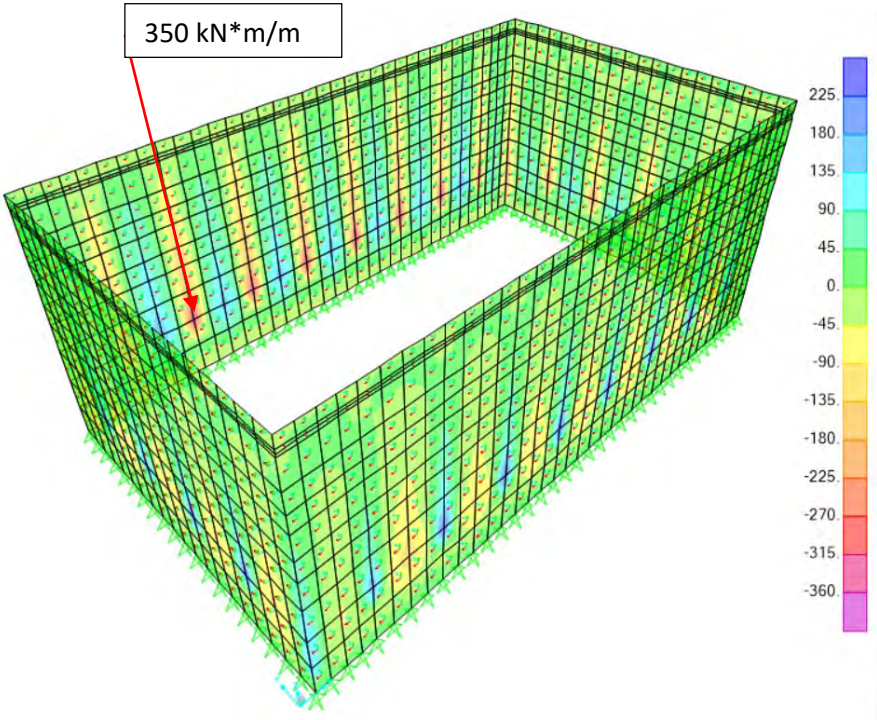


Figura 60 – M11 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes exteriores del momento torsor M12:

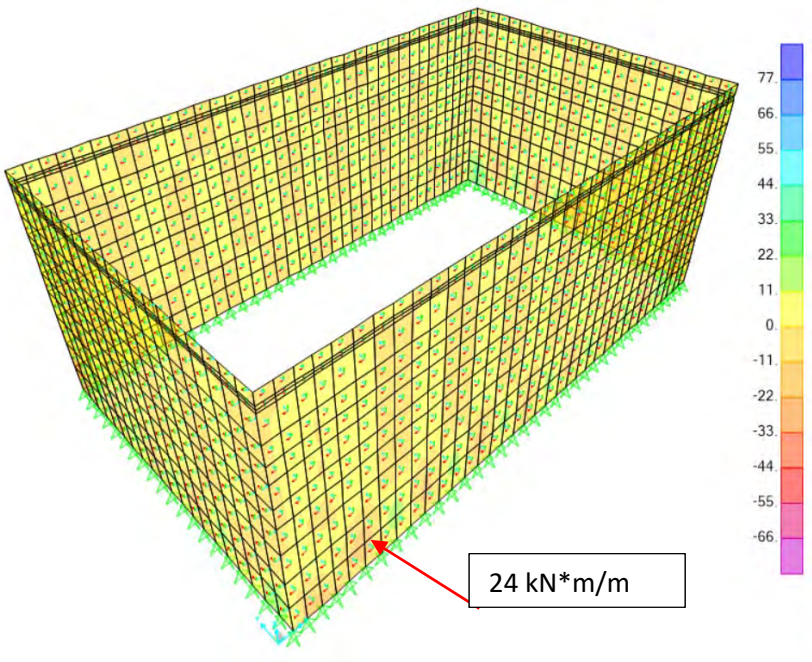


Figura 61 – M12 ELS Seno de la ola

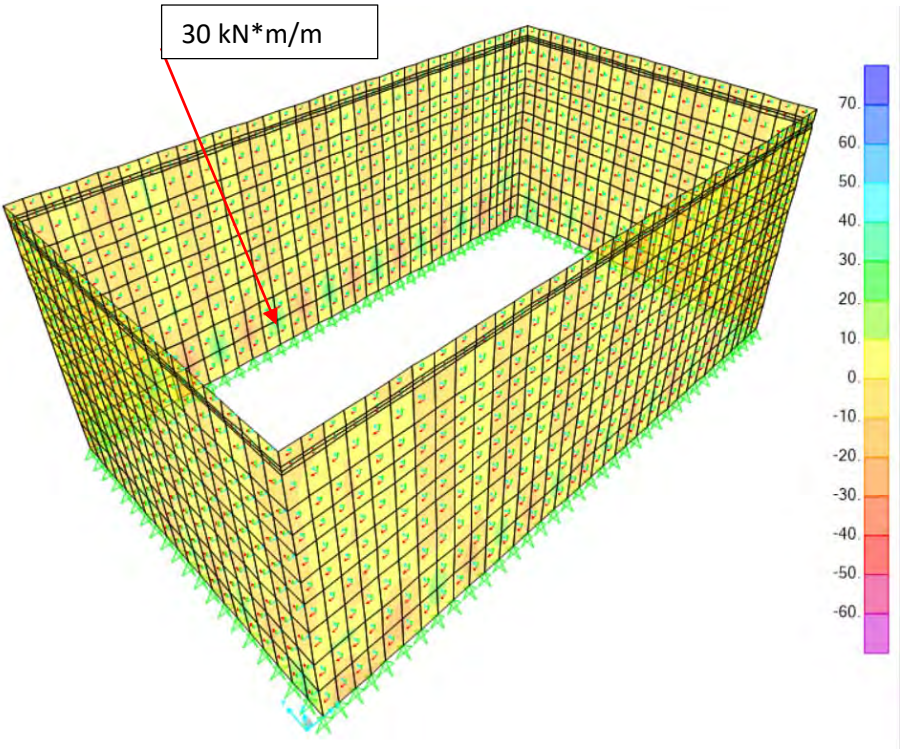


Figura 62 – M12 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje horizontal:

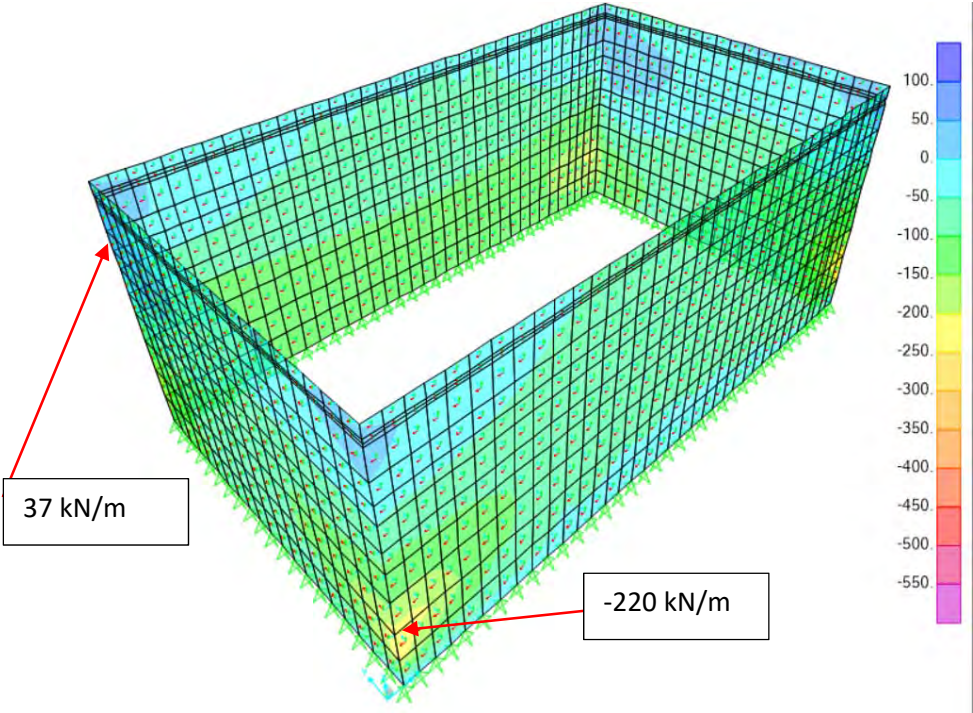


Figura 63 – F11 ELS Seno de la ola

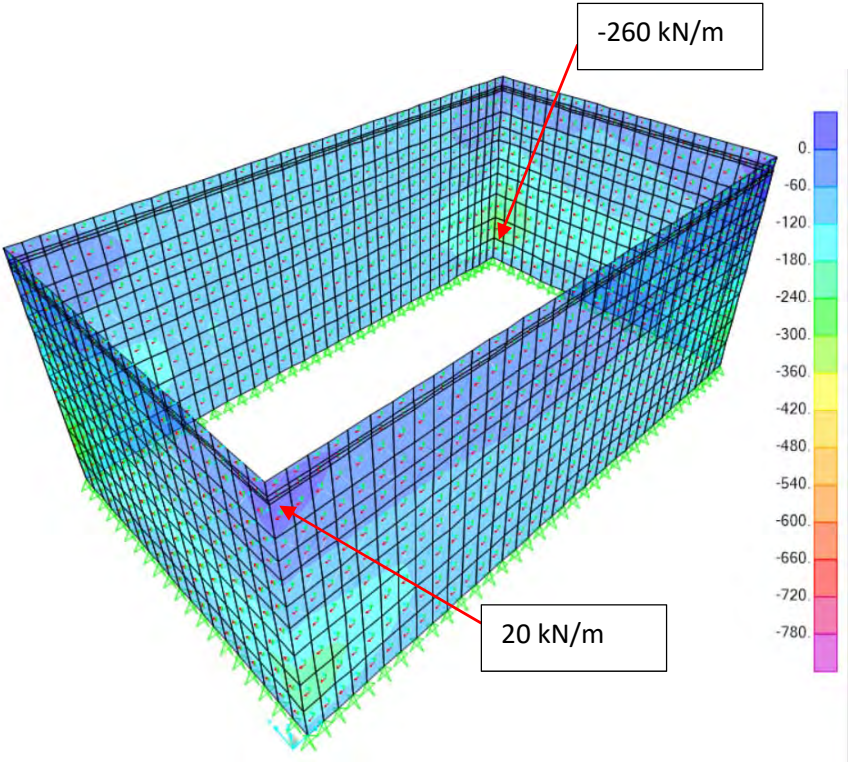


Figura 64 – F11 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje vertical:

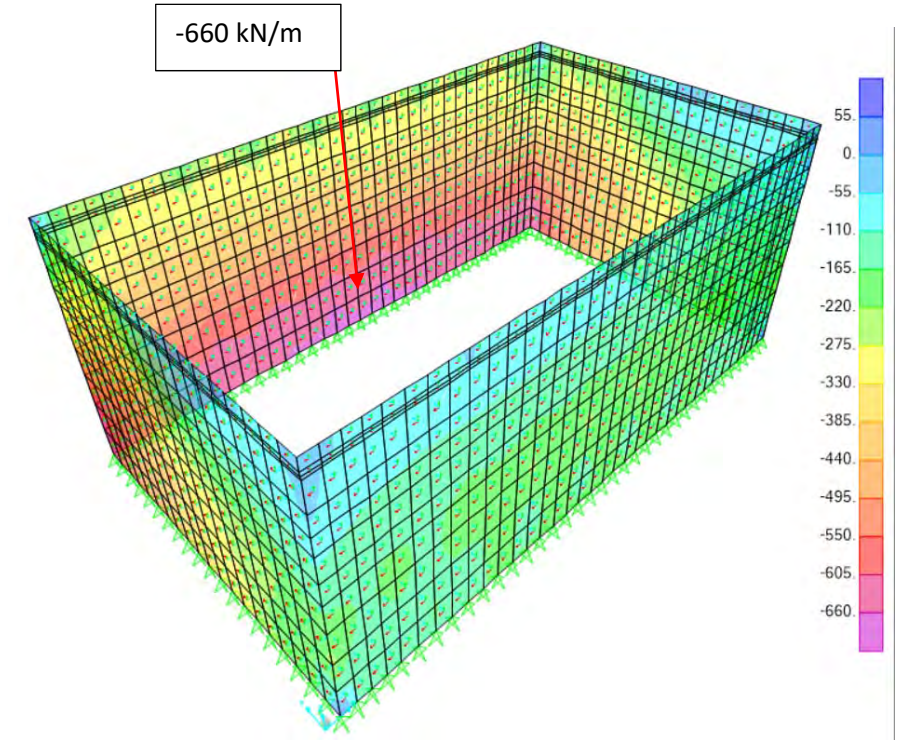


Figura 65 – F22 ELS Seno de la ola

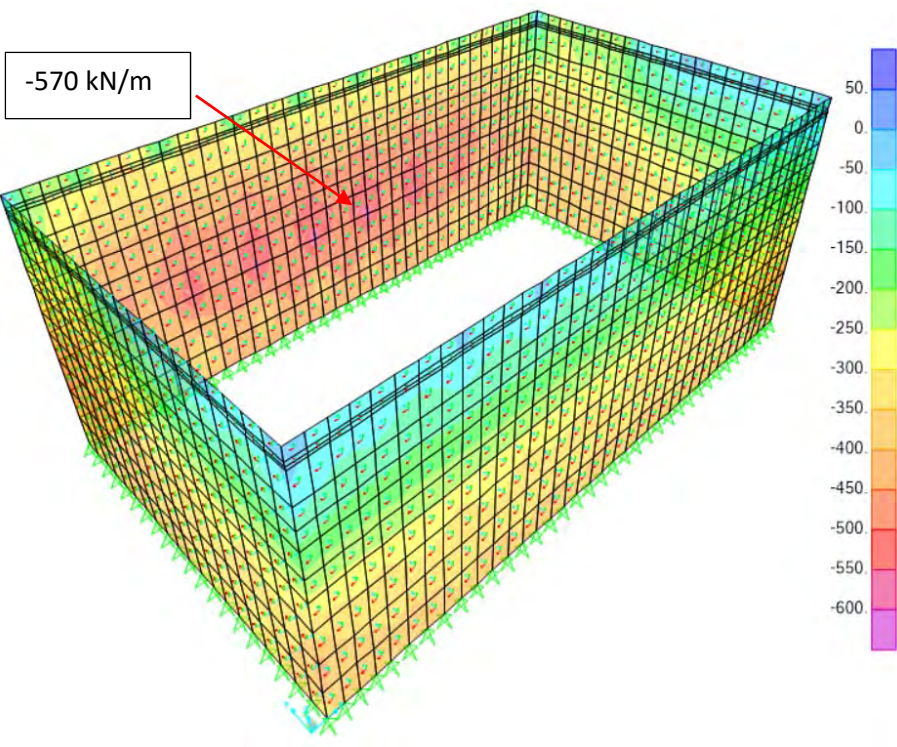


Figura 66 – F22 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V13:

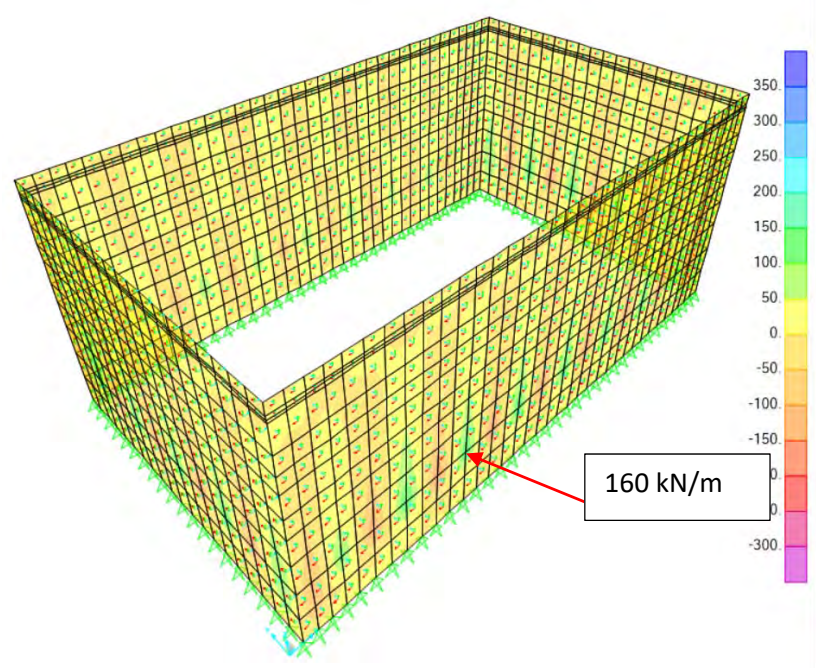


Figura 67 – V13 ELS Seno de la ola

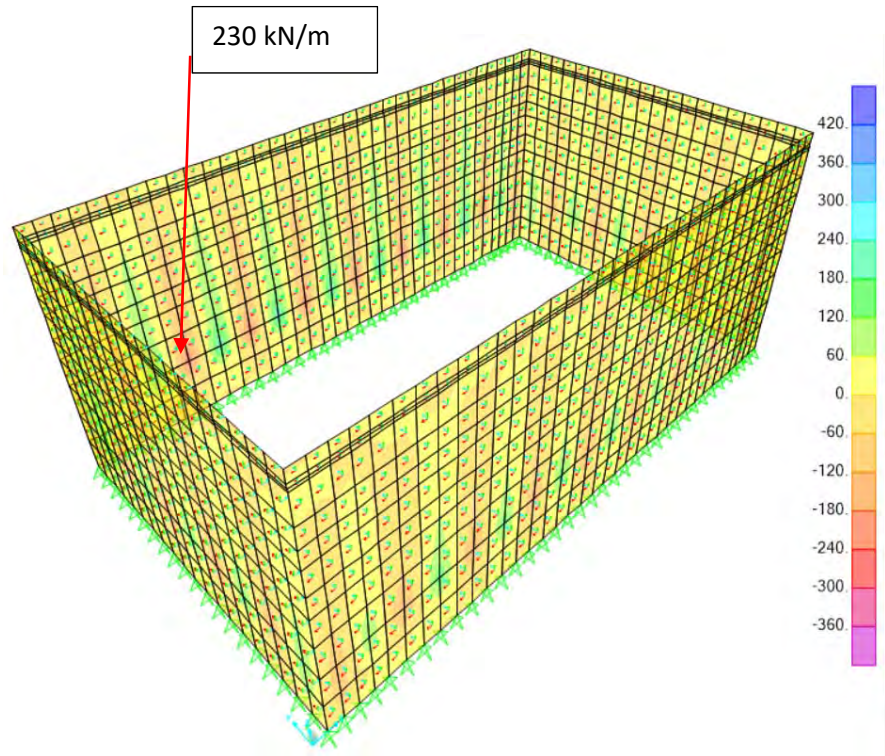


Figura 68 – V13 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes exteriores del cortante V23:

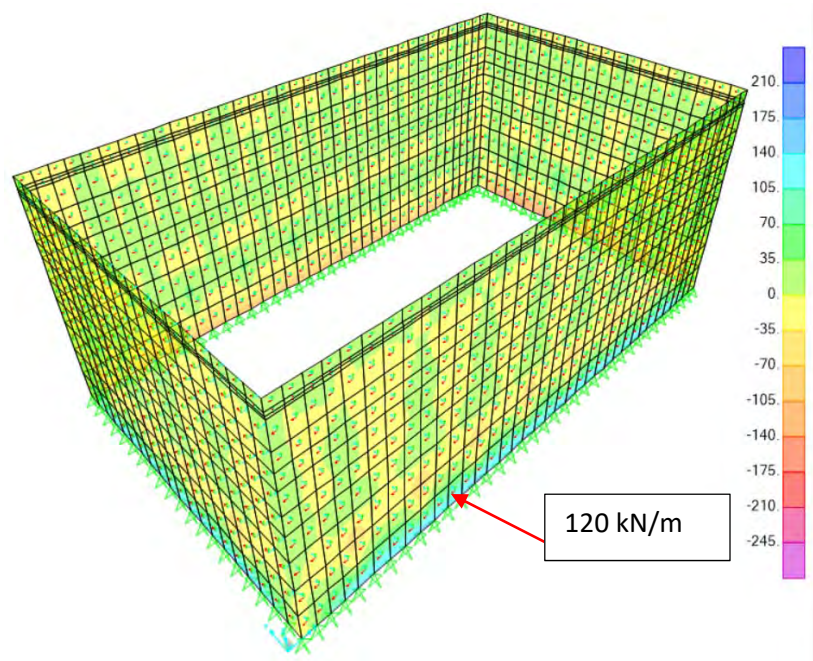


Figura 69 – V23 ELS Seno de la ola

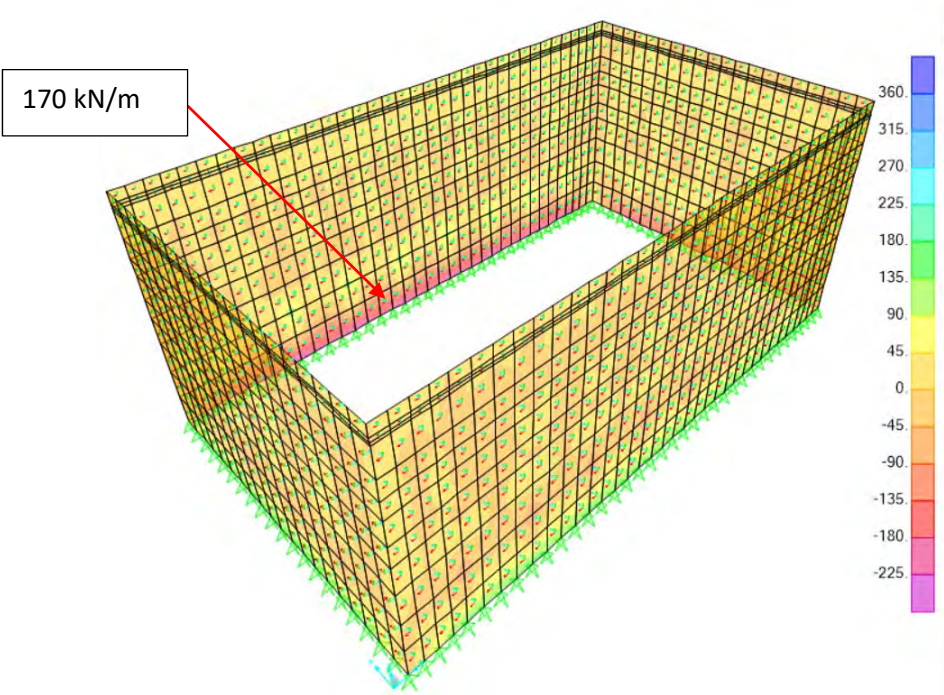


Figura 70 – V23 ELS Cresta de la ola

### 1.2.2. Paredes interiores

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje horizontal:

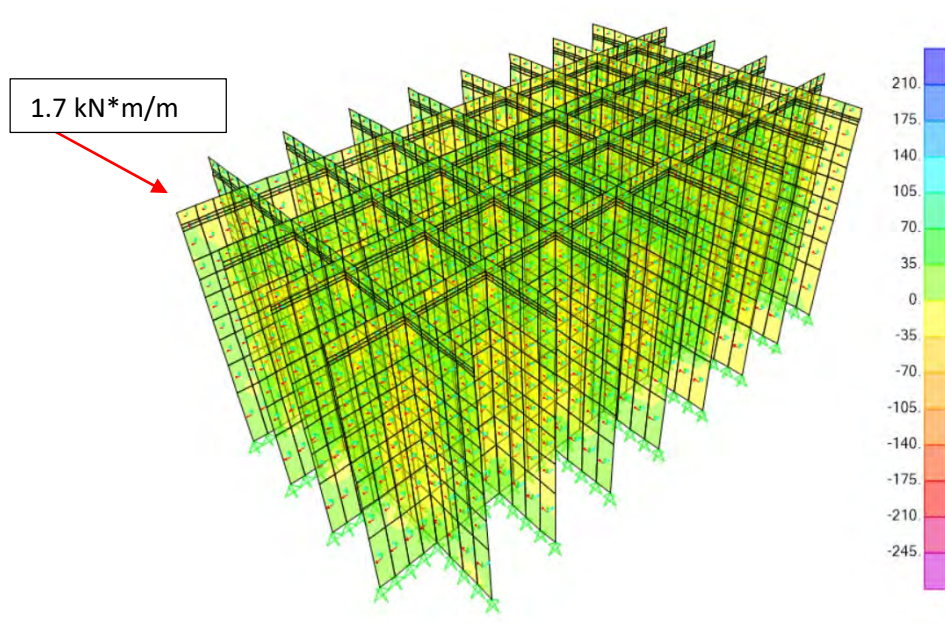


Figura 71 – M22 ELS Seno de la ola

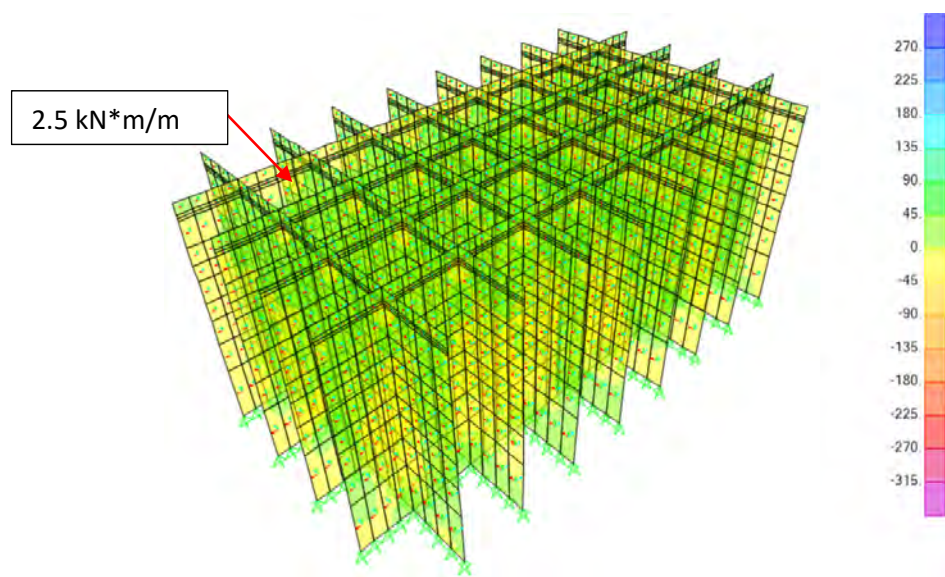


Figura 72 – M22 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje vertical:

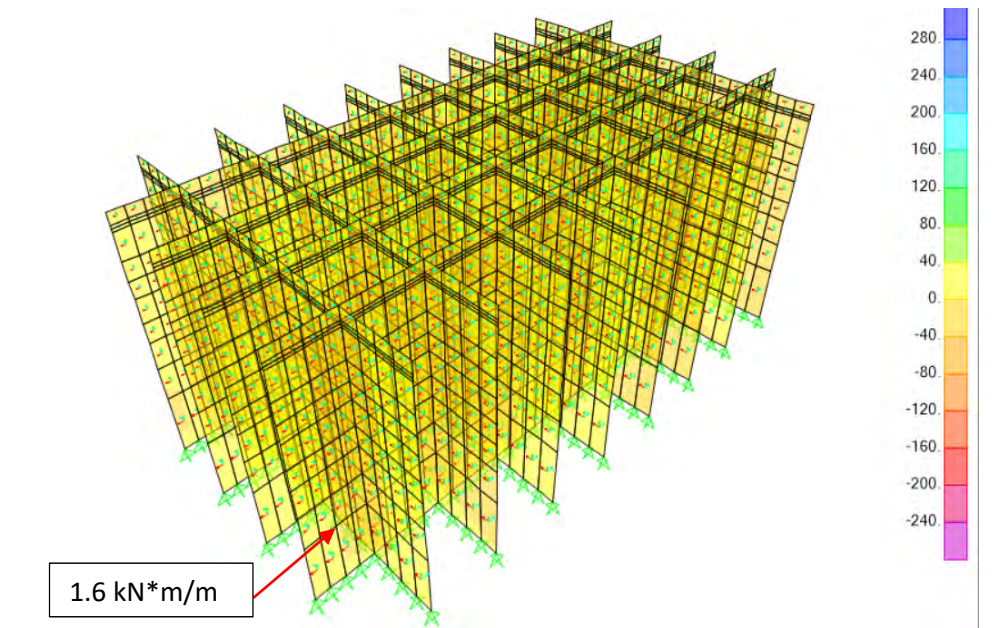


Figura 73 – M11 ELS Seno de la ola

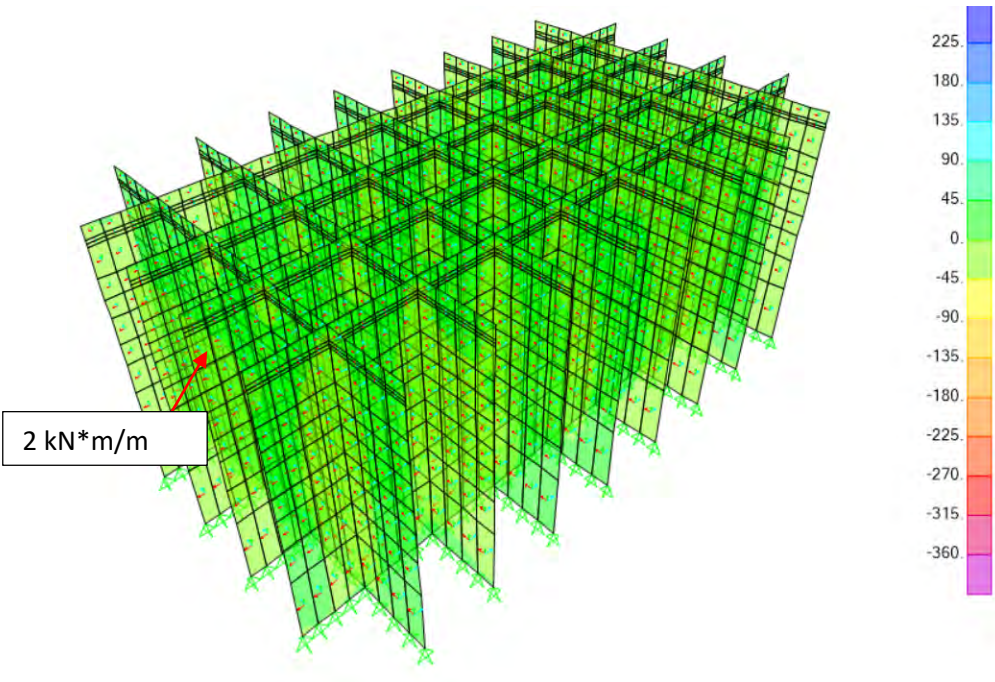


Figura 74 – M11 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento torsor M12:

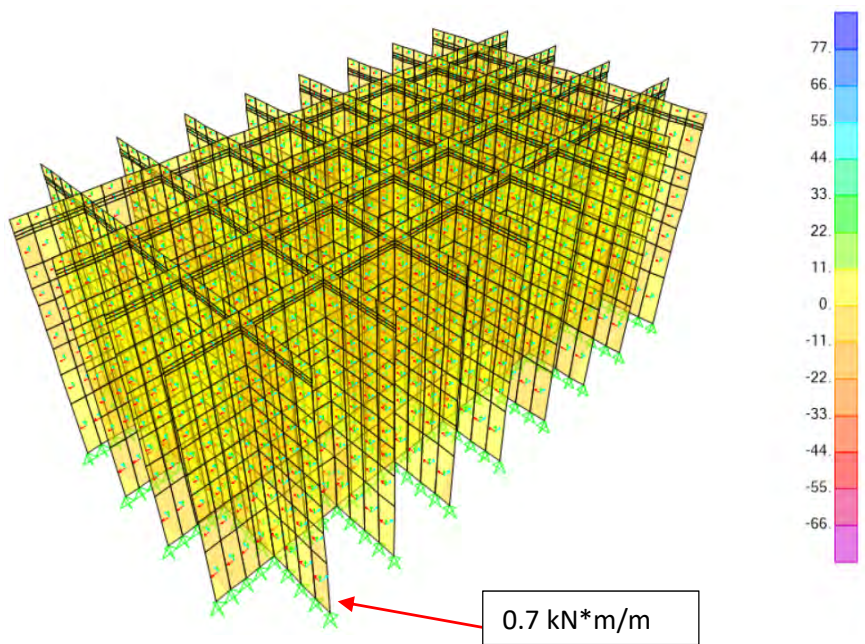


Figura 75 – M12 ELS Seno de la ola

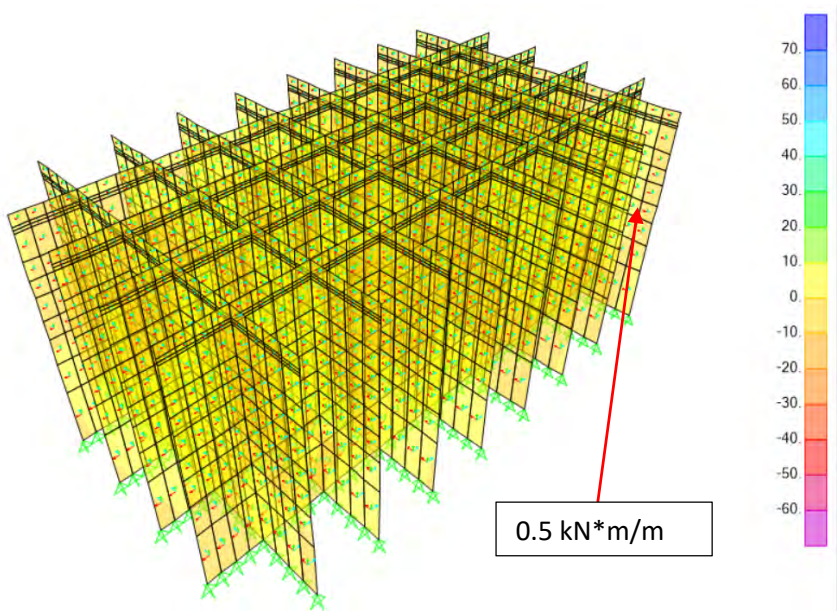
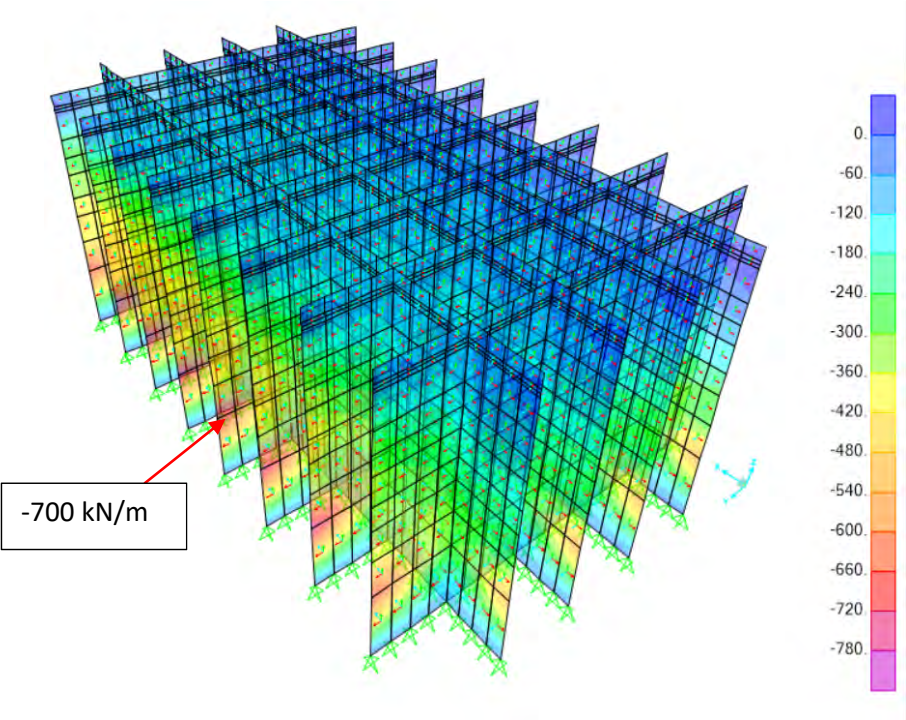
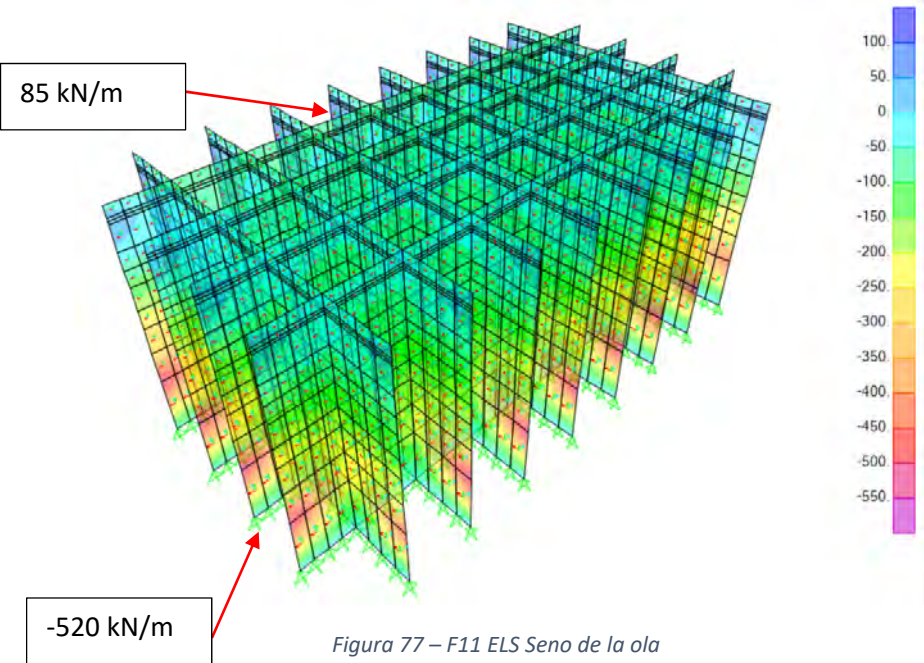


Figura 76 – M12 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje horizontal:



Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje vertical:

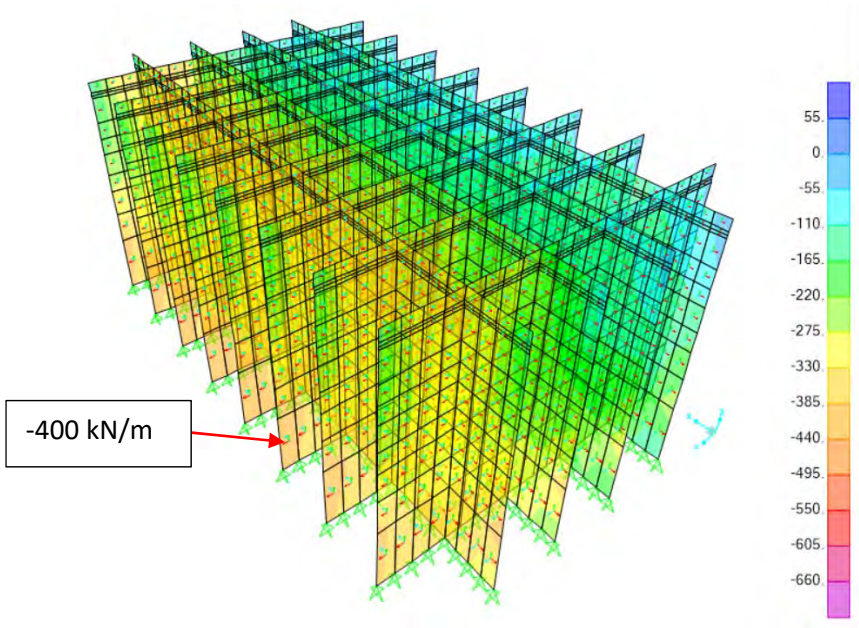


Figura 79 – F22 ELS Seno de la ola

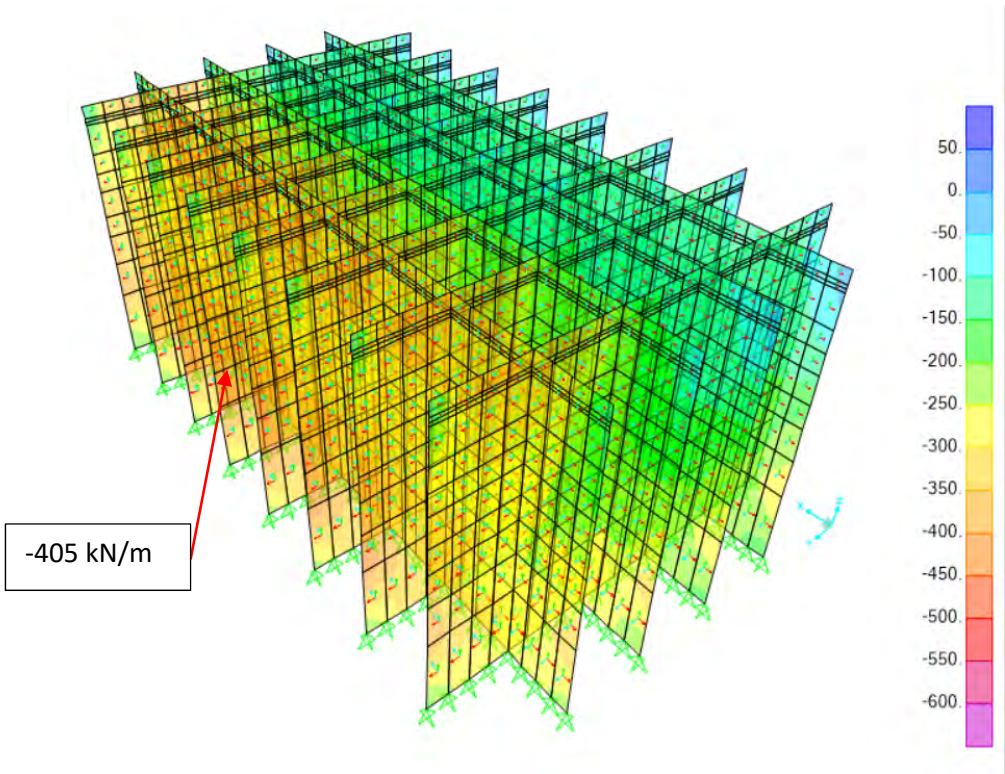


Figura 80 – F22 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes interiores del cortante V13:

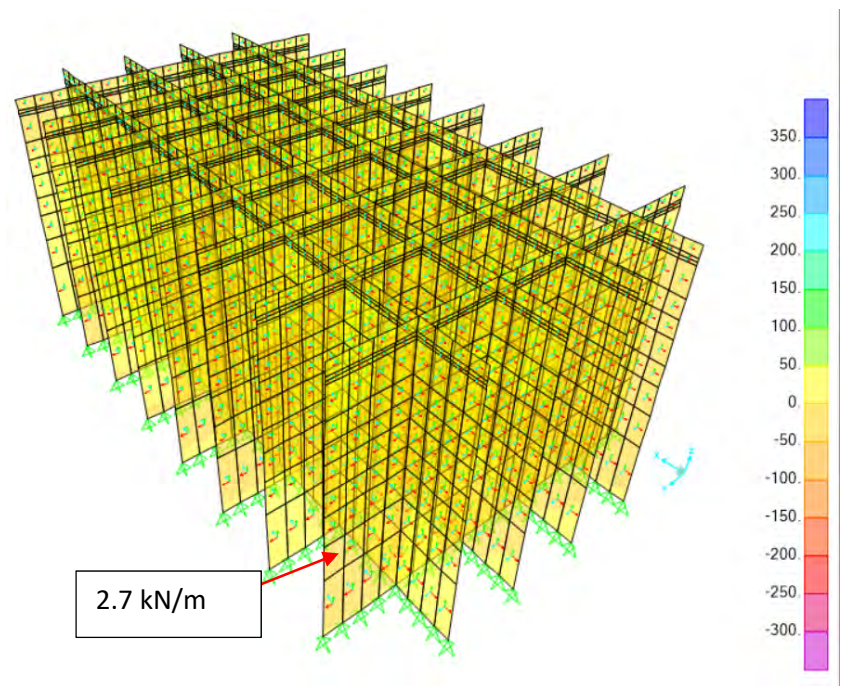


Figura 81 – V13 ELS Seno de la ola

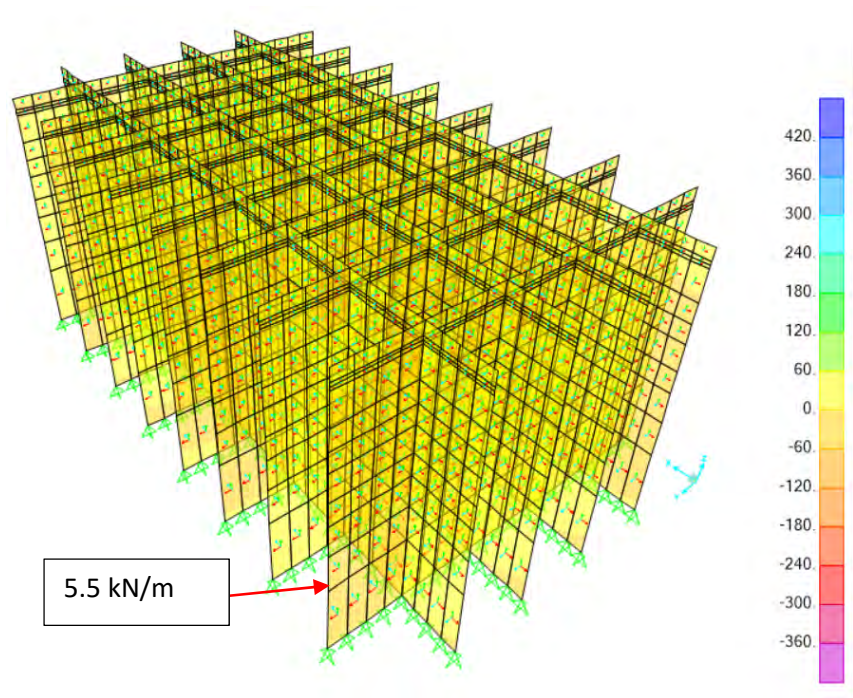


Figura 82 – V13 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del cortante V23:

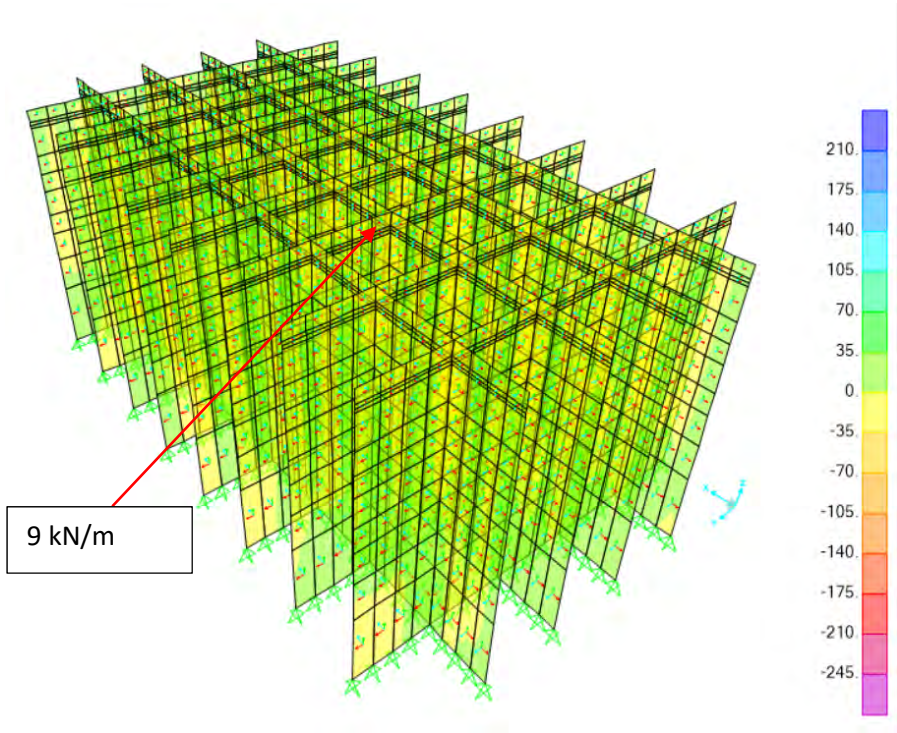


Figura 83 – V23 ELS Seno de la ola

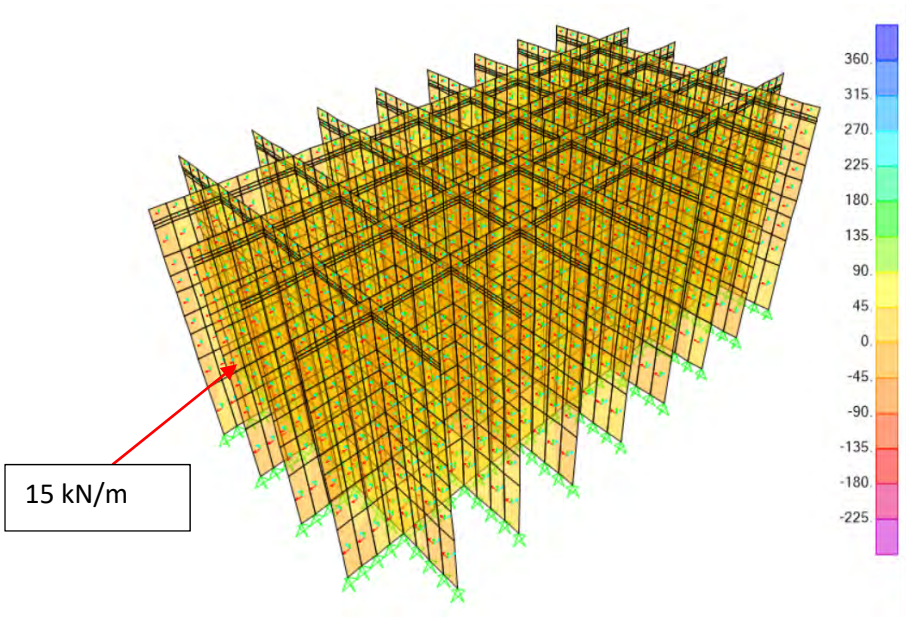


Figura 84 – V23 ELS Cresta de la ola



### 1.2.3. Resumen ELS celdas rectangulares

Paredes exteriores							
	M22 (kN*m/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	F11 (kN/m)	F22 (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)
ELS Cresta de la ola	260	350	30	20/-260	-570	230	170
ELS Seno de la ola	170	230	24	37/-220	-660	160	120

Paredes interiores							
	M22 (kN*m/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	F11 (kN/m)	F22 (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)
ELS Cresta de la ola	2.5	5	0.5	-700	-405	5.5	15
ELS Seno de la ola	1.7	1.6	0.7	85/-520	-400	2.7	9

## 2. Resultados modelo celdas circulares

### 2.1. ELU

#### 2.1.1. Paredes exteriores

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje horizontal:

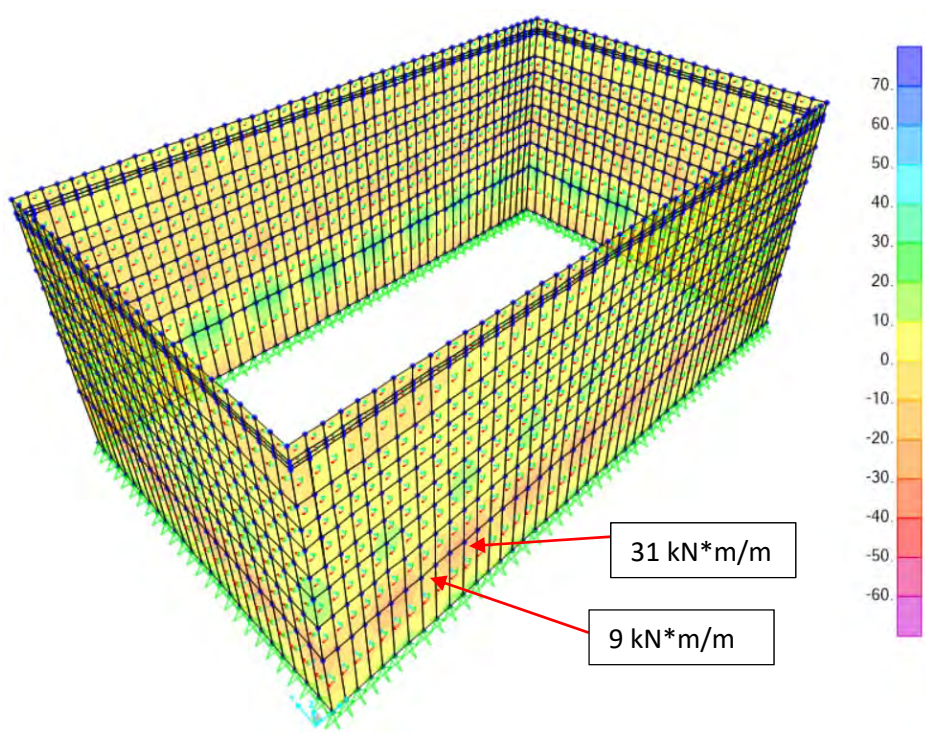


Figura 85 – M22 ELU Flotación

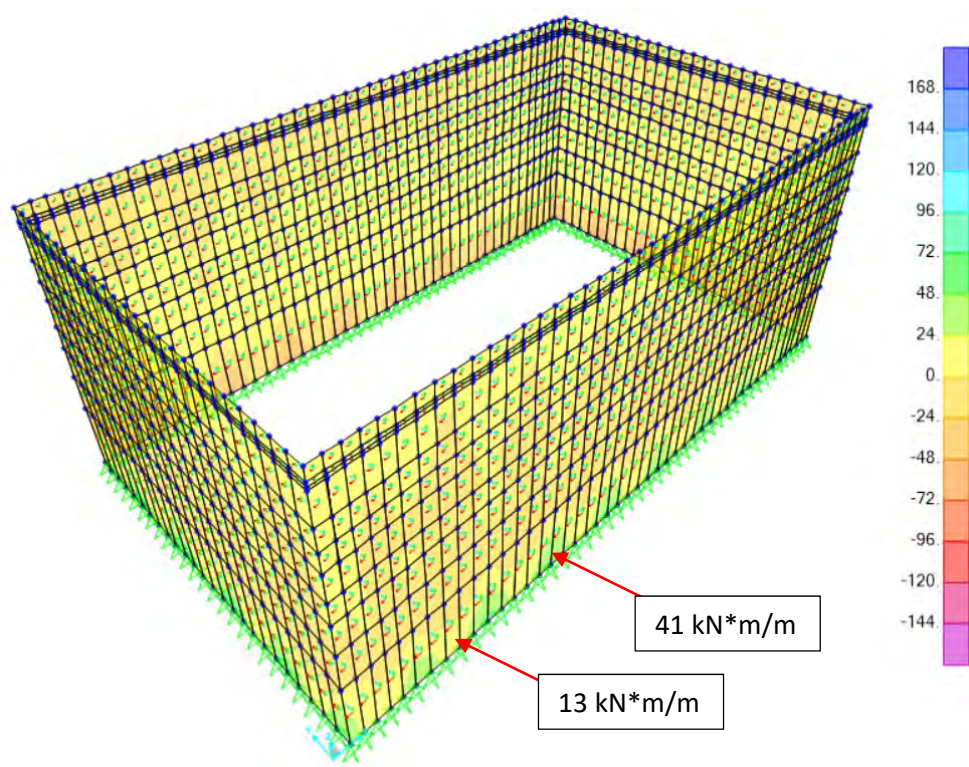


Figura 86 – M22 ELU Fondeo

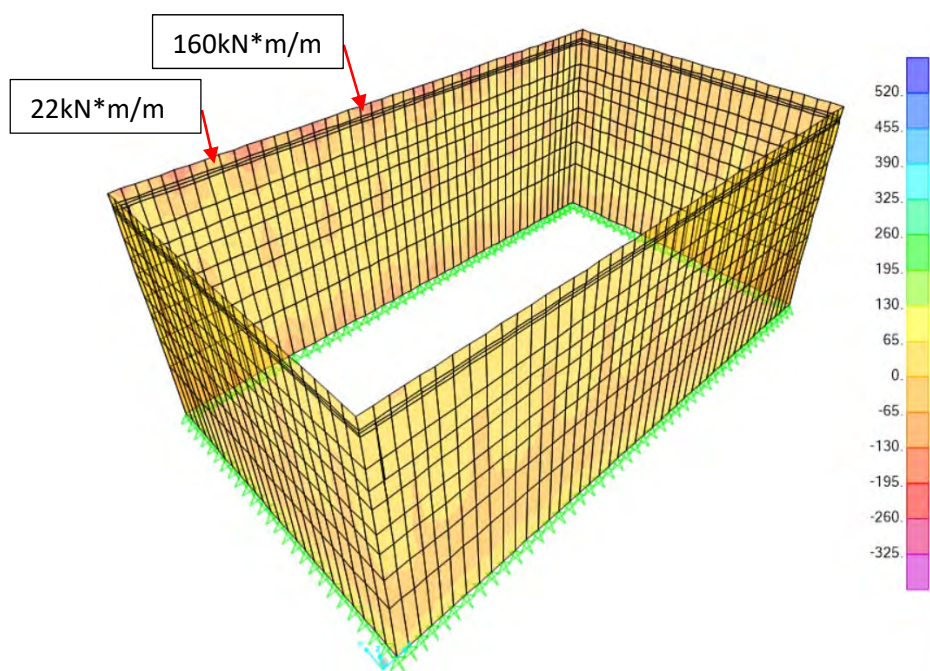


Figura 87 – M22 ELU Cresta de la ola



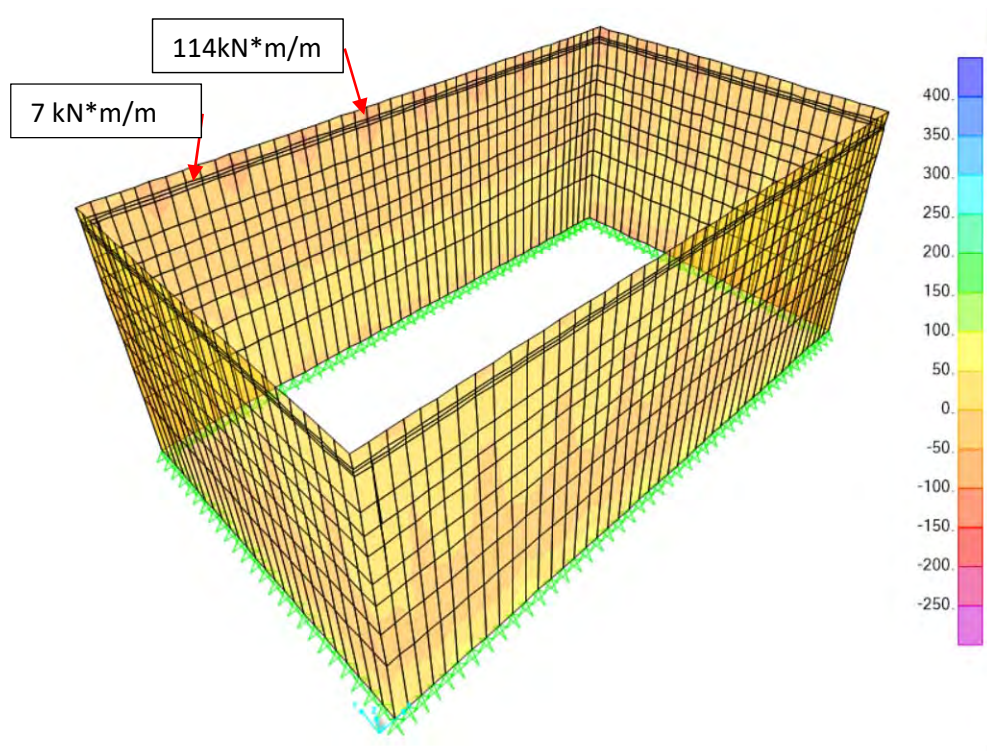


Figura 88 – M22 ELU Seno de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje vertical:

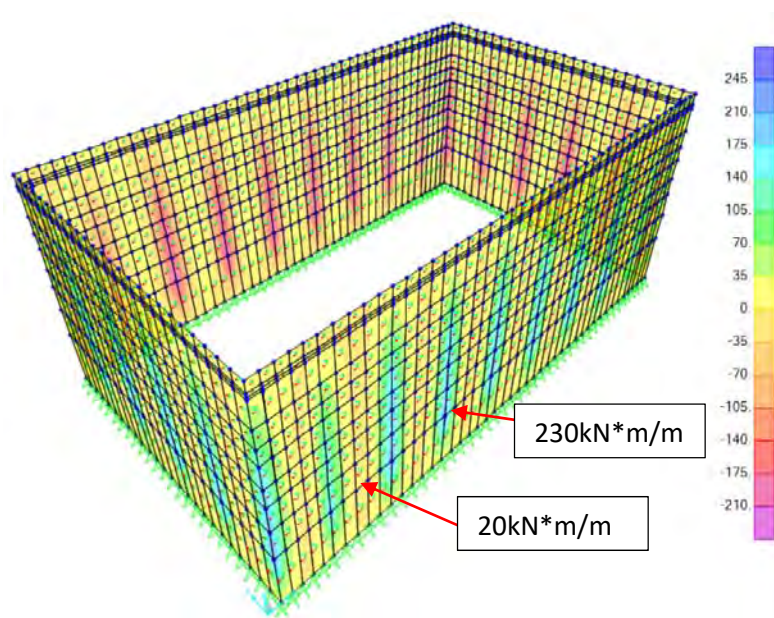


Figura 89 – M11 ELU Fondeo

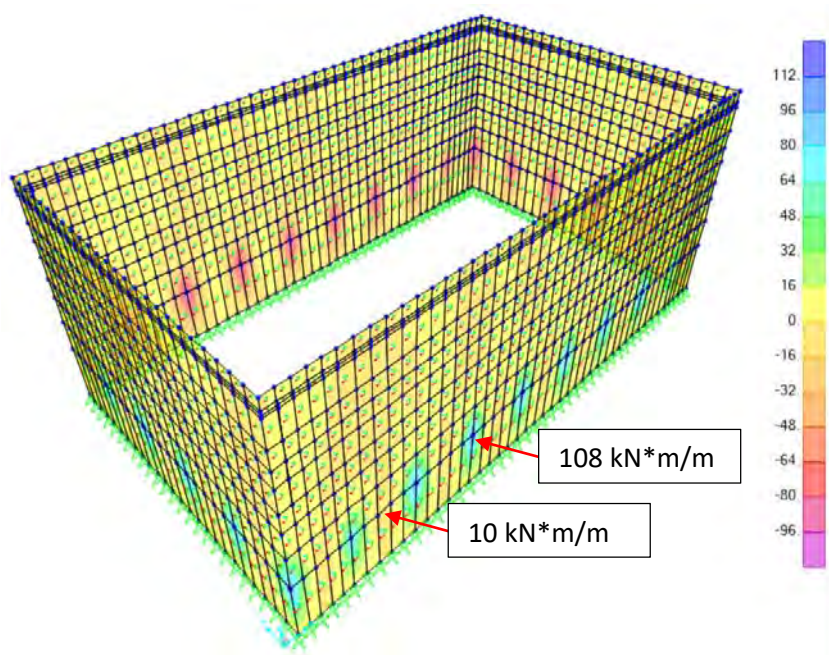


Figura 90 – M11 ELU Flotación

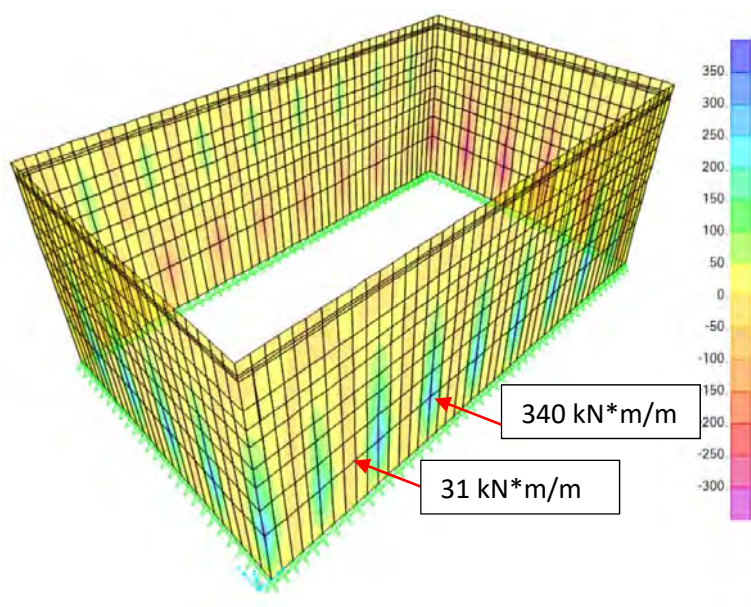


Figura 91 – M11 ELU Seno de la ola



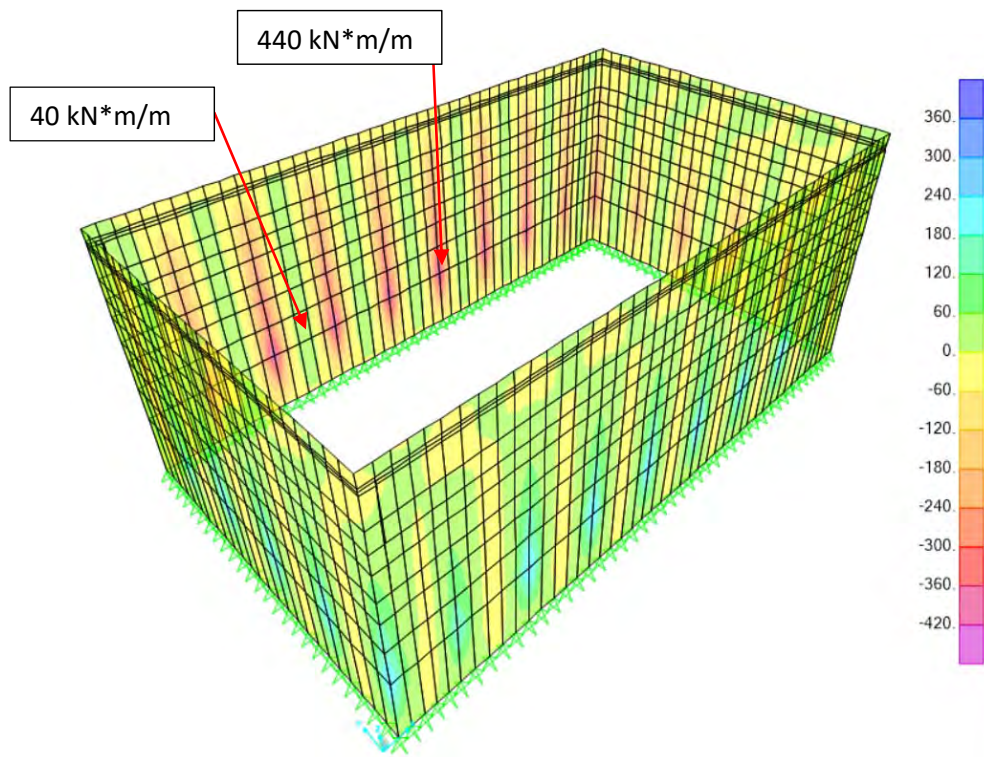


Figura 92 – M11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento torsor M12:

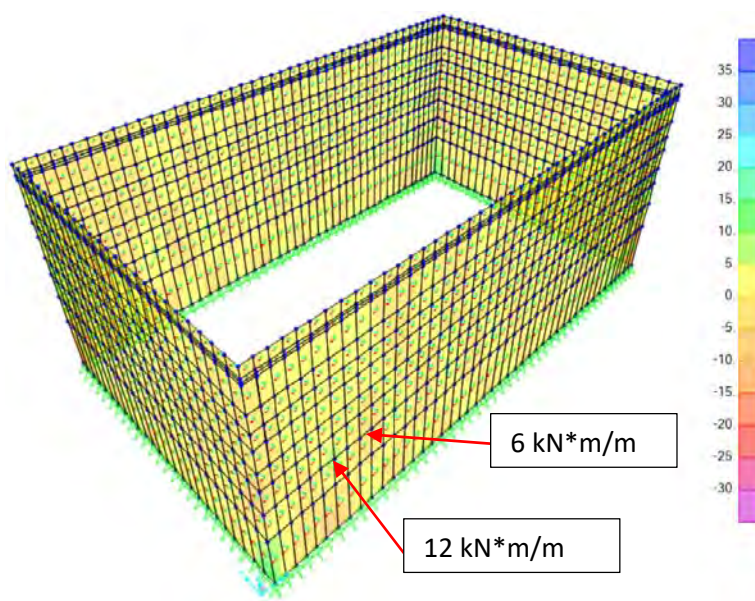


Figura 93 – M12 ELU Flotación

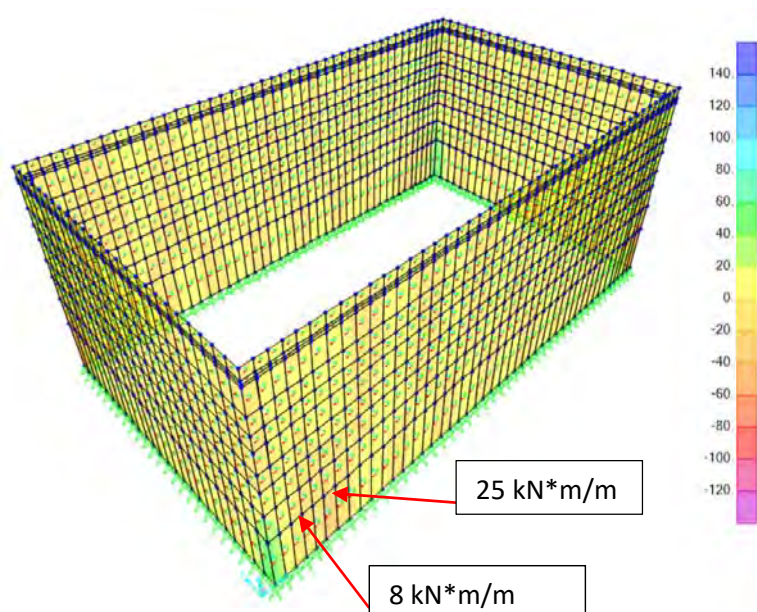


Figura 94 – M12 ELU Fondo

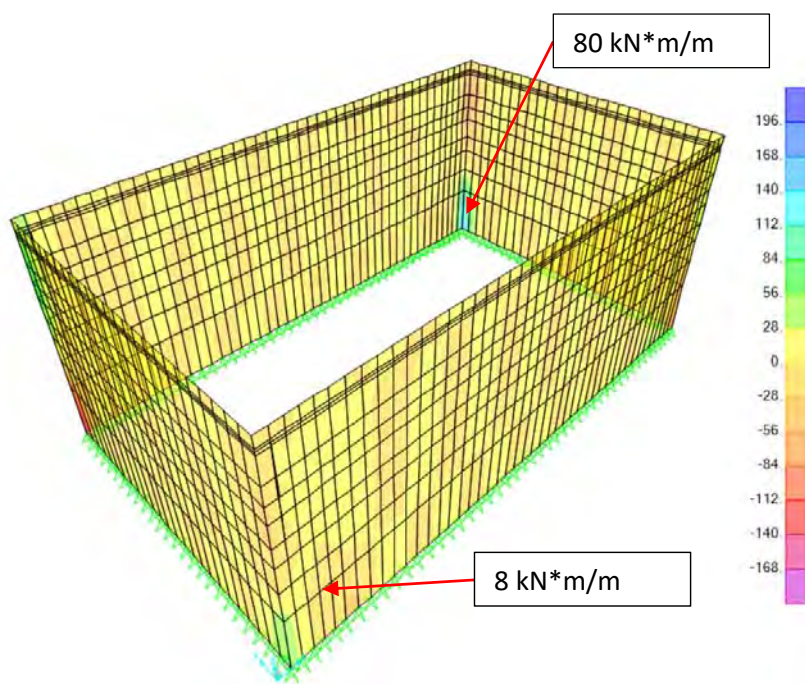


Figura 95 – M12 ELU Seno de la ola



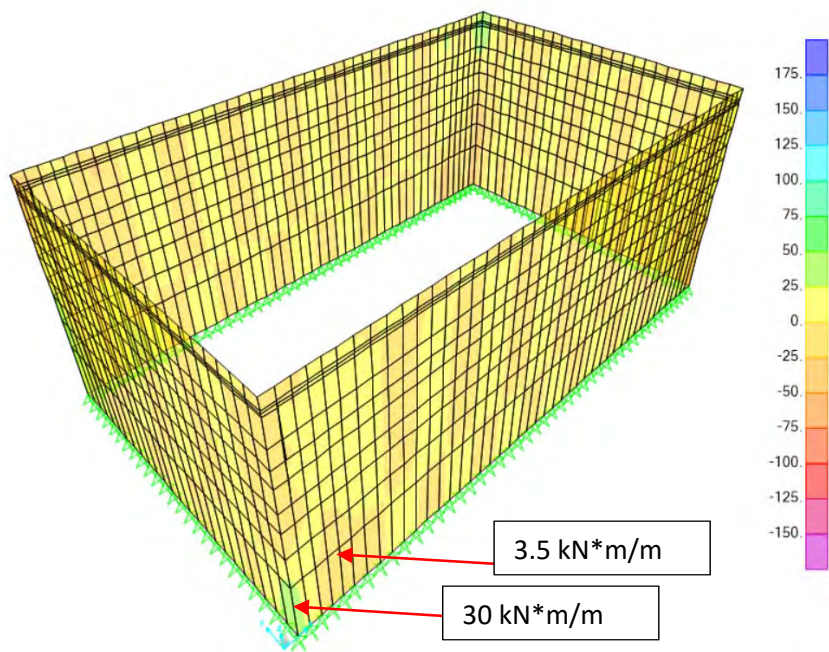


Figura 96 – M12 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje horizontal:

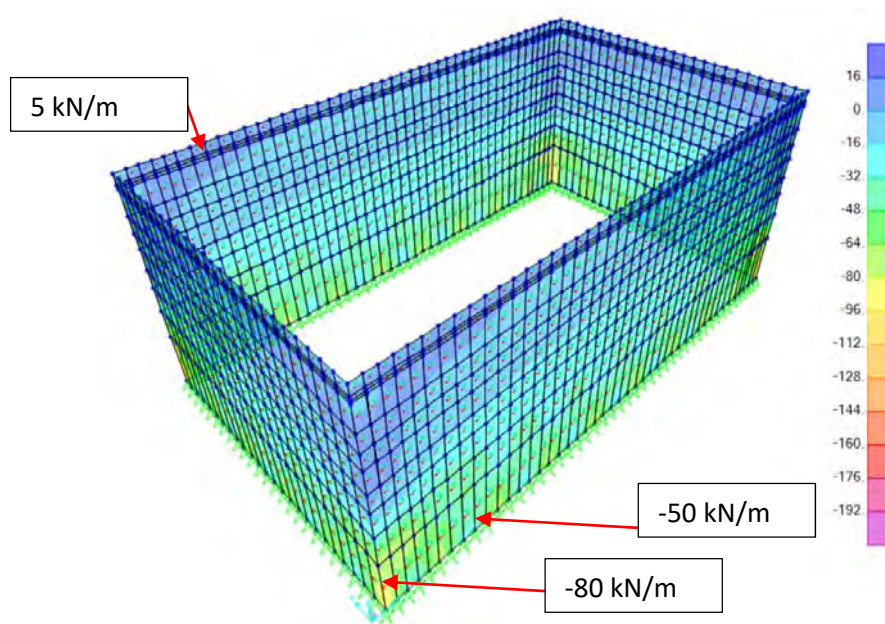


Figura 97 – F11 ELU Flotación

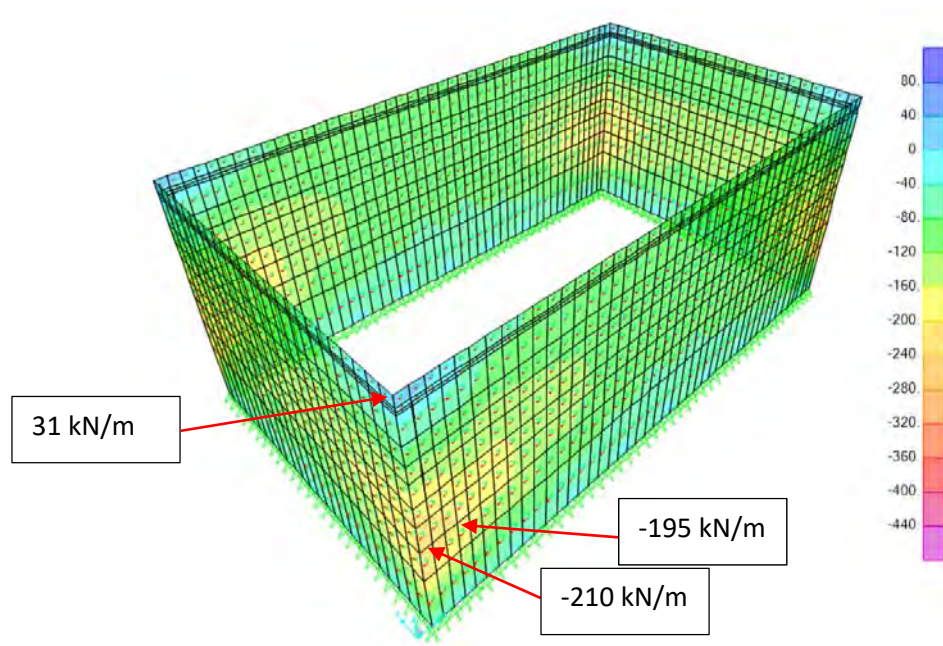


Figura 98 – F11 ELU Fondeo

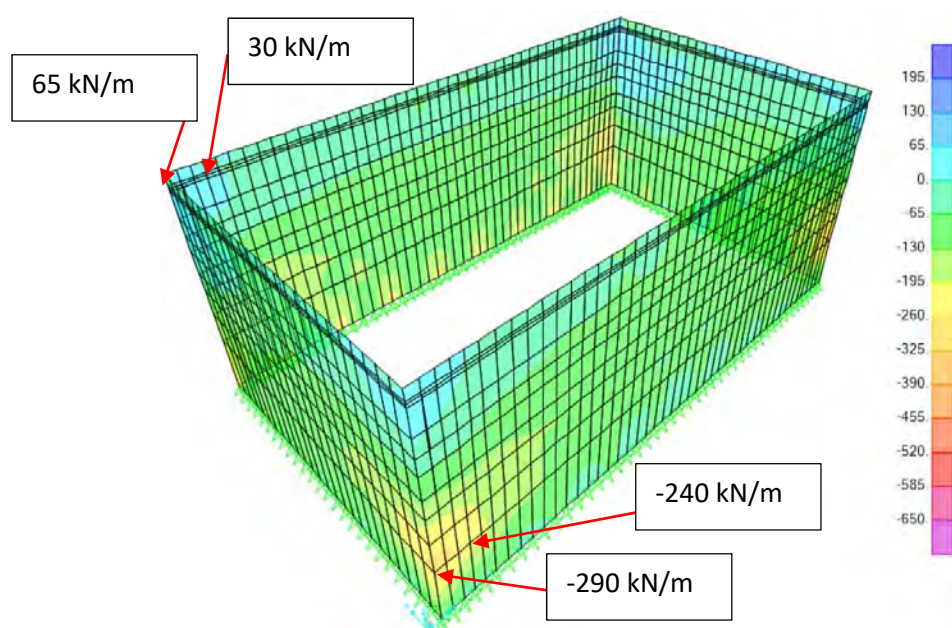


Figura 99 – F11 ELU Seno de la ola



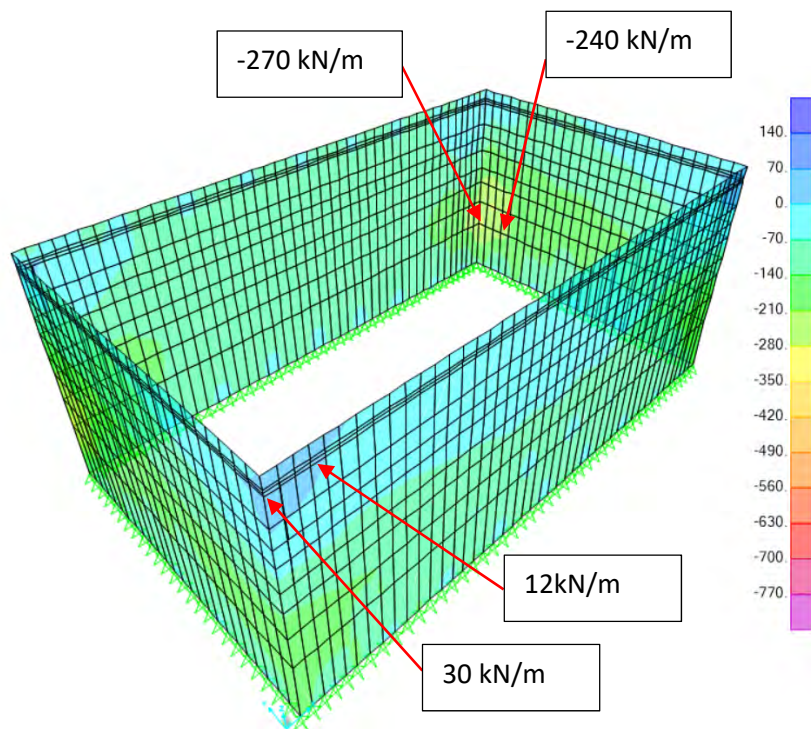


Figura 100 – F11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje vertical:

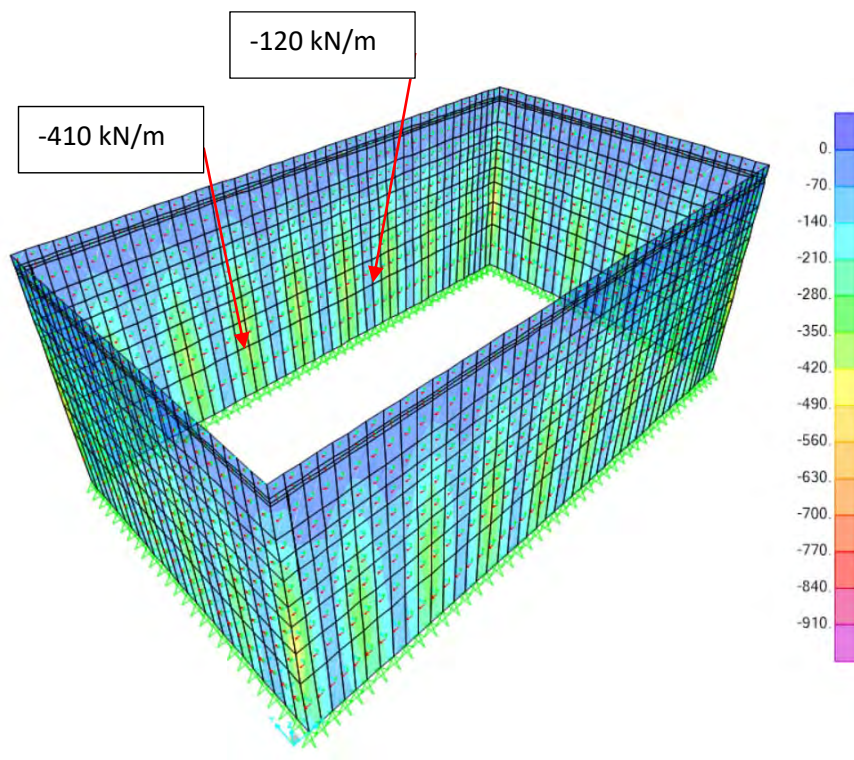


Figura 101 – F22 ELU Fondeo

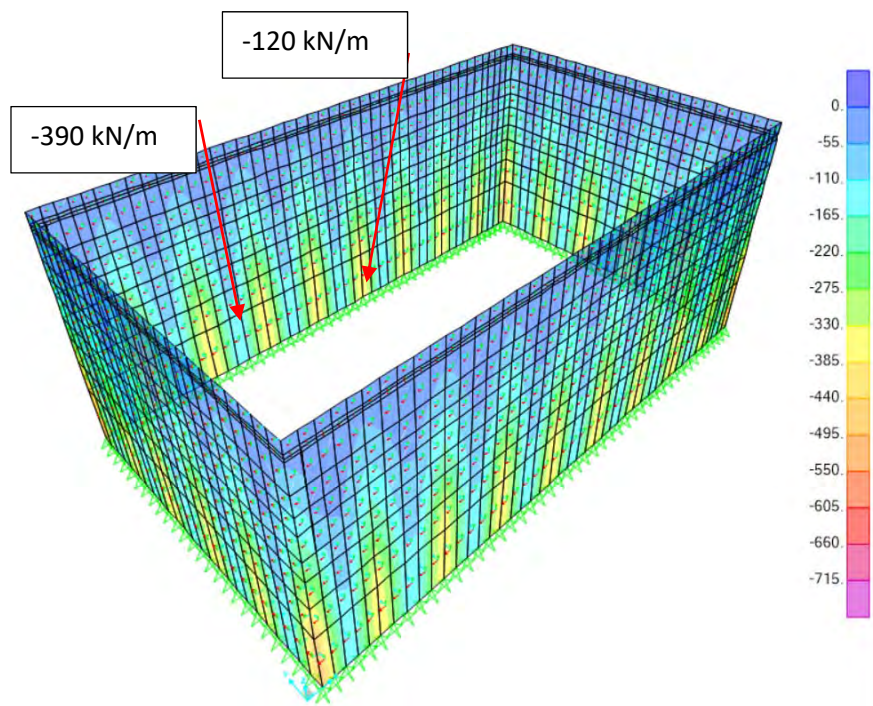


Figura 102 – F22 ELU Flotación

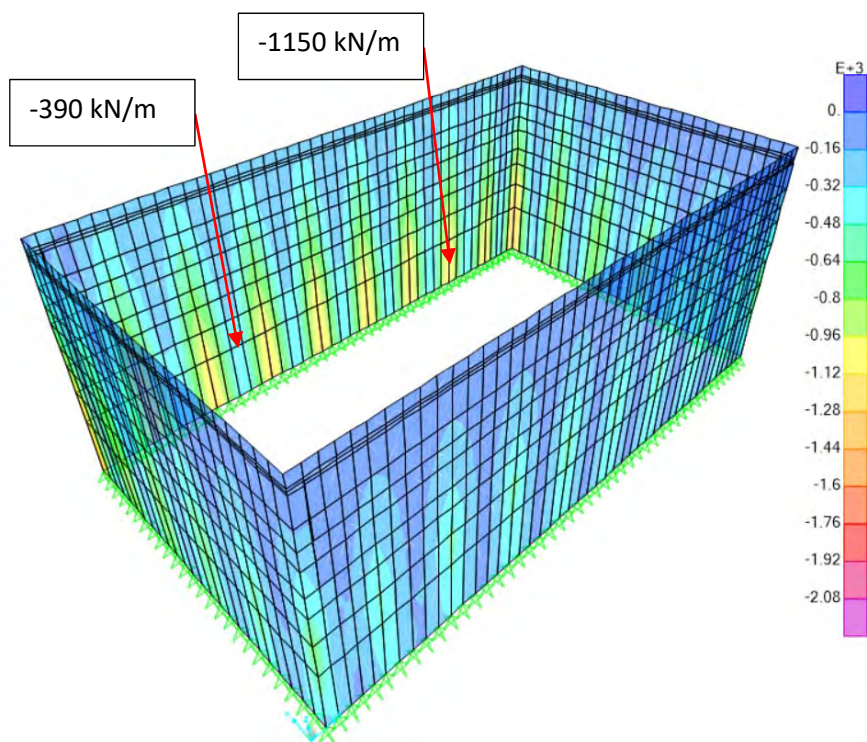


Figura 103 – F22 ELU Seno de la ola



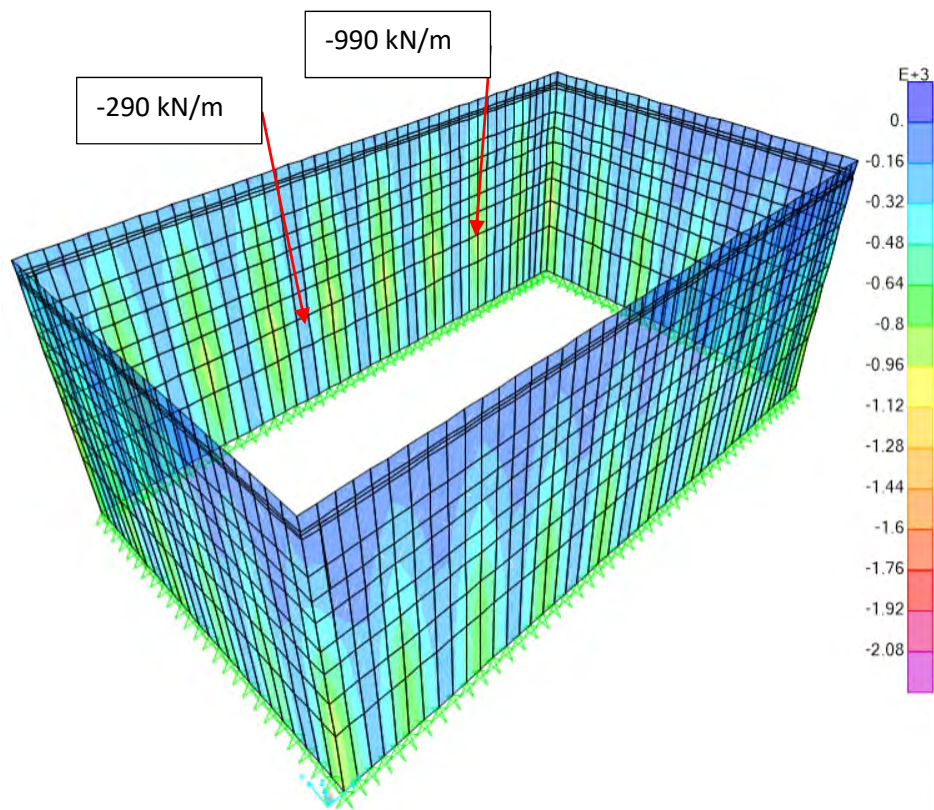


Figura 104 – F22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V13:

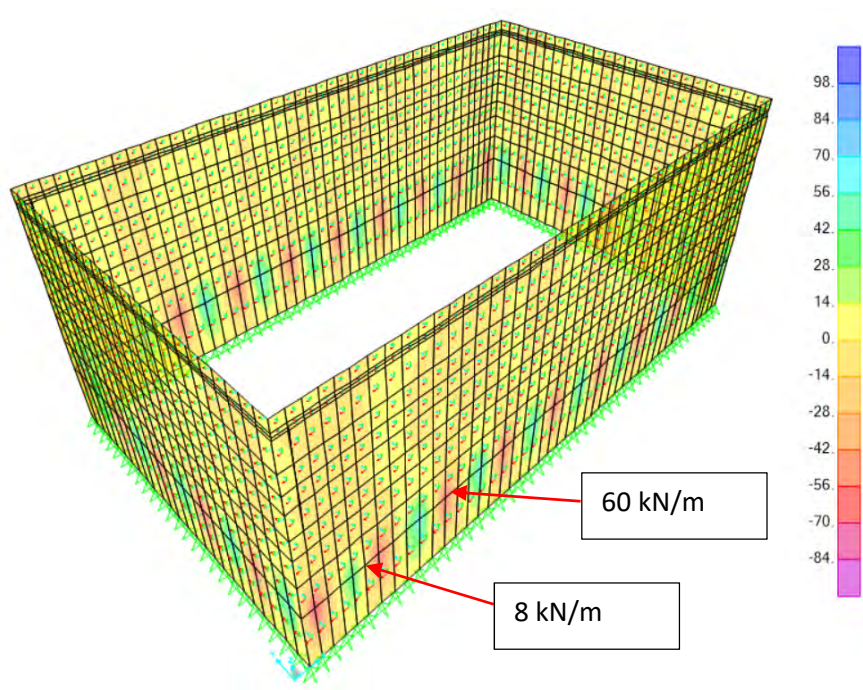


Figura 105 – V13 ELU Flotación

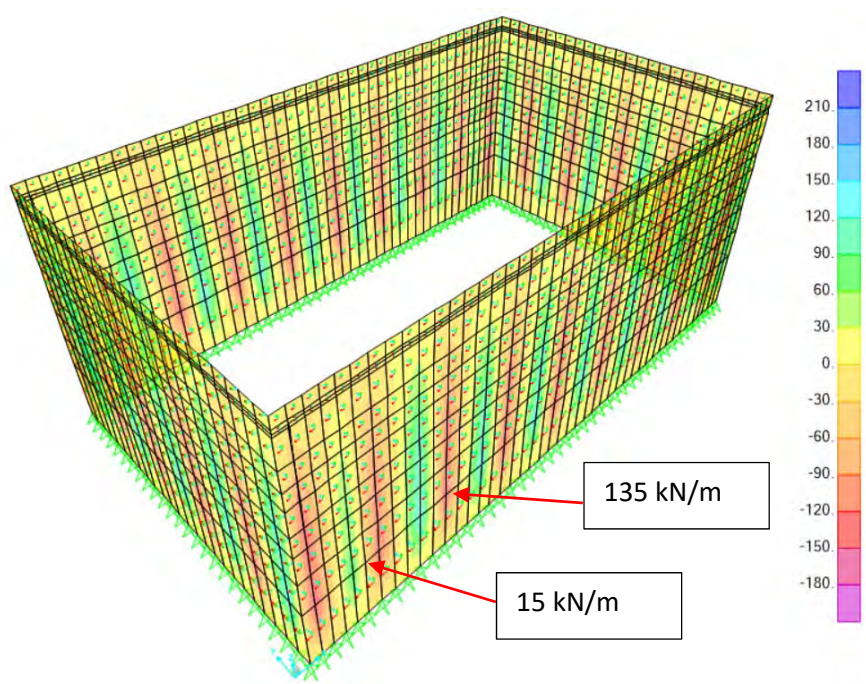


Figura 106 – V13 ELU Fondeo

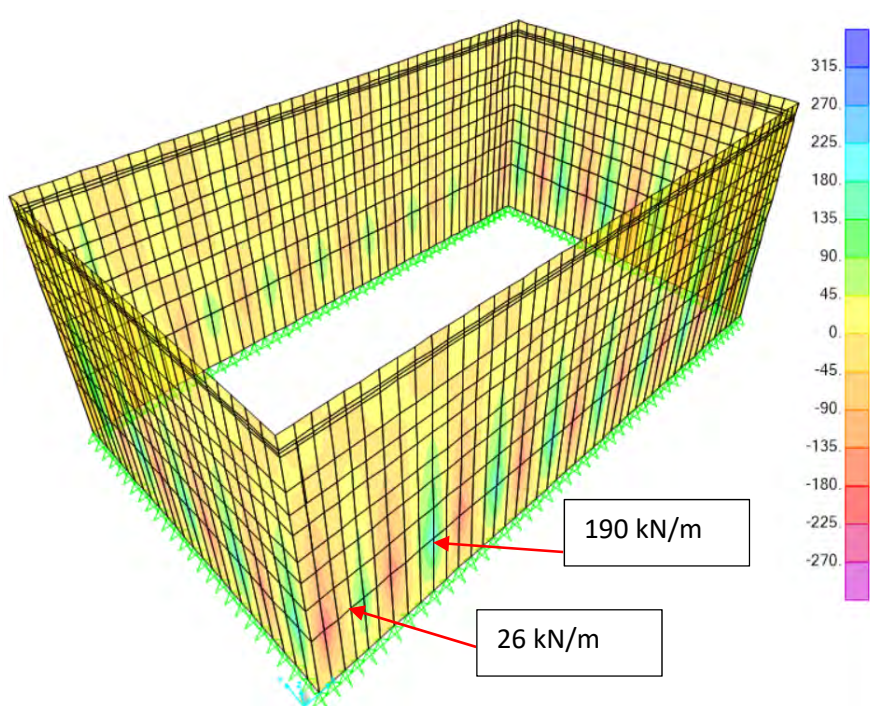


Figura 107 – V13 ELU Seno de la ola



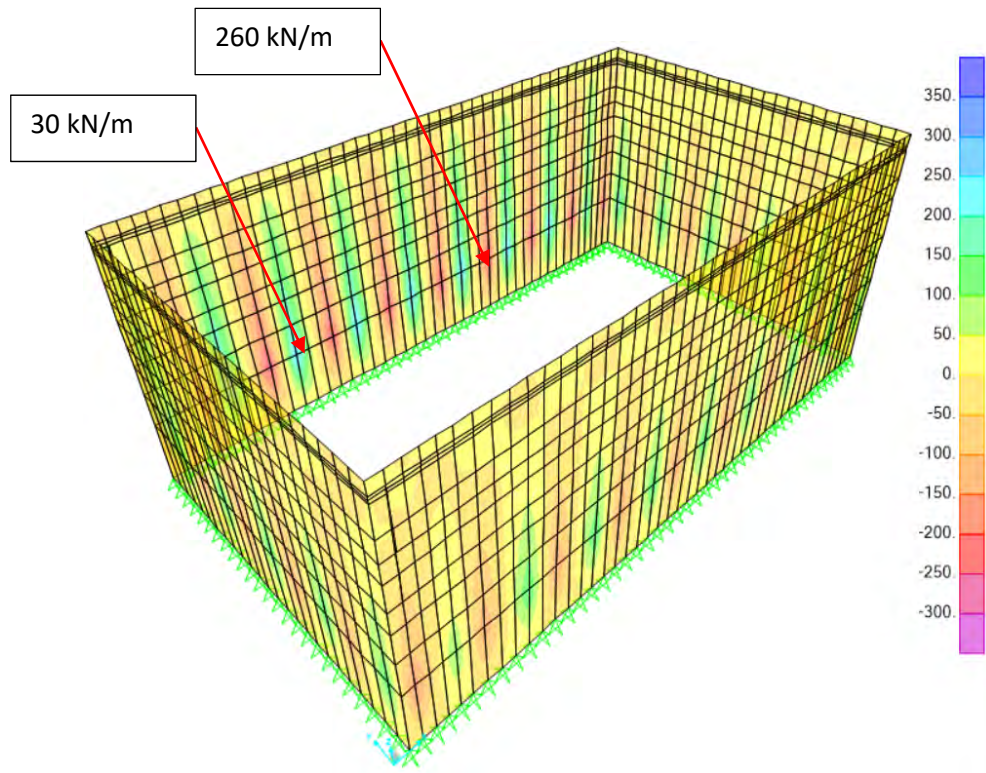


Figura 108 – V13 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V23:

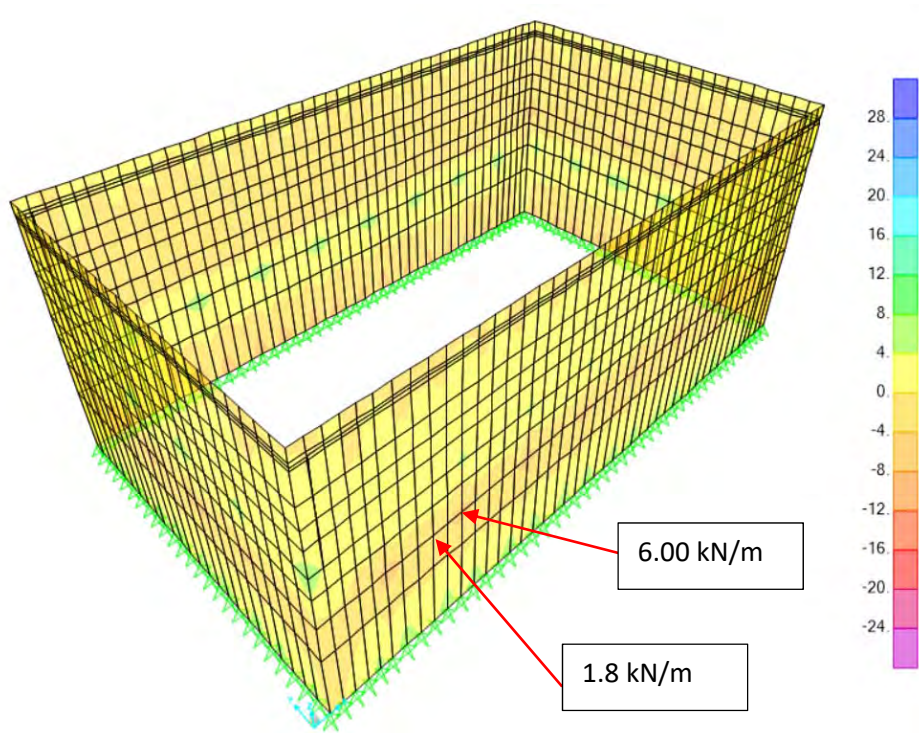


Figura 109 – V23 ELU Flotación

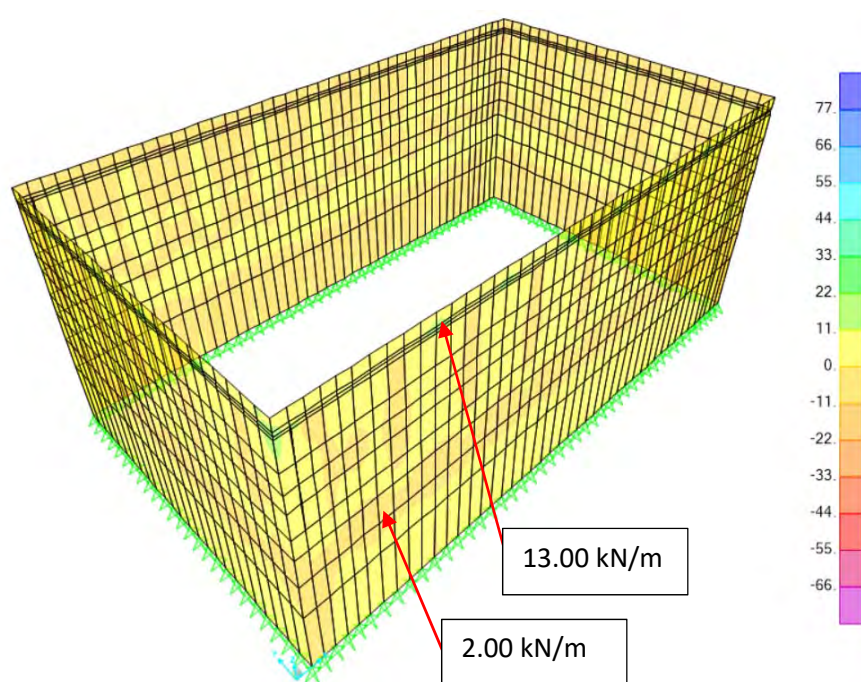


Figura 110 – V23 ELU Fondeo

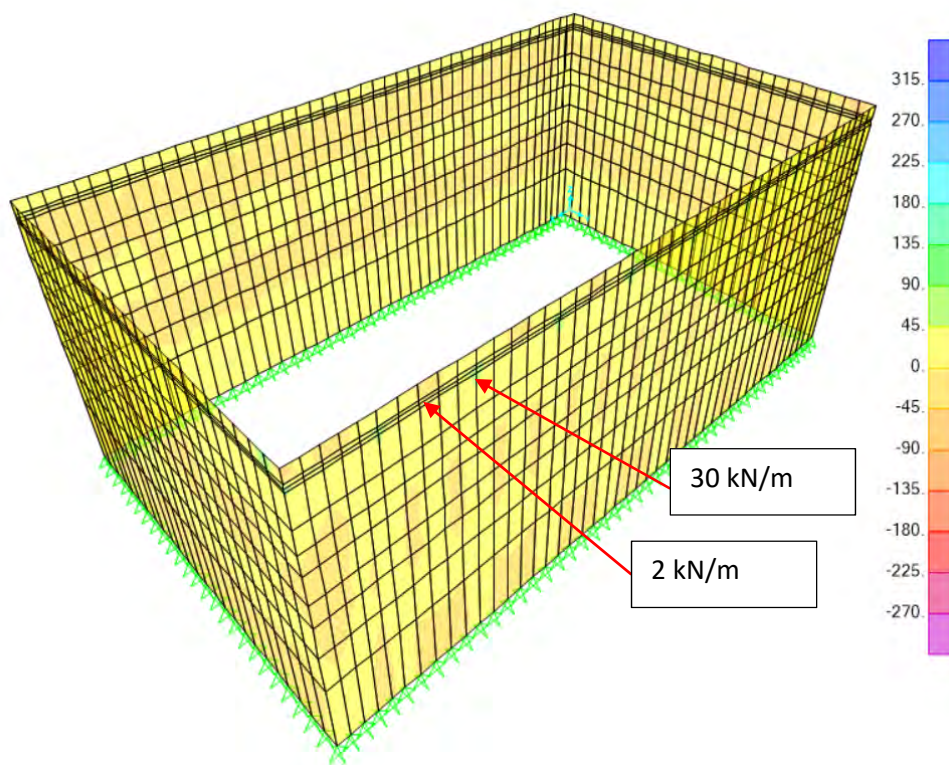


Figura 111 – V23 ELU Seno de la ola



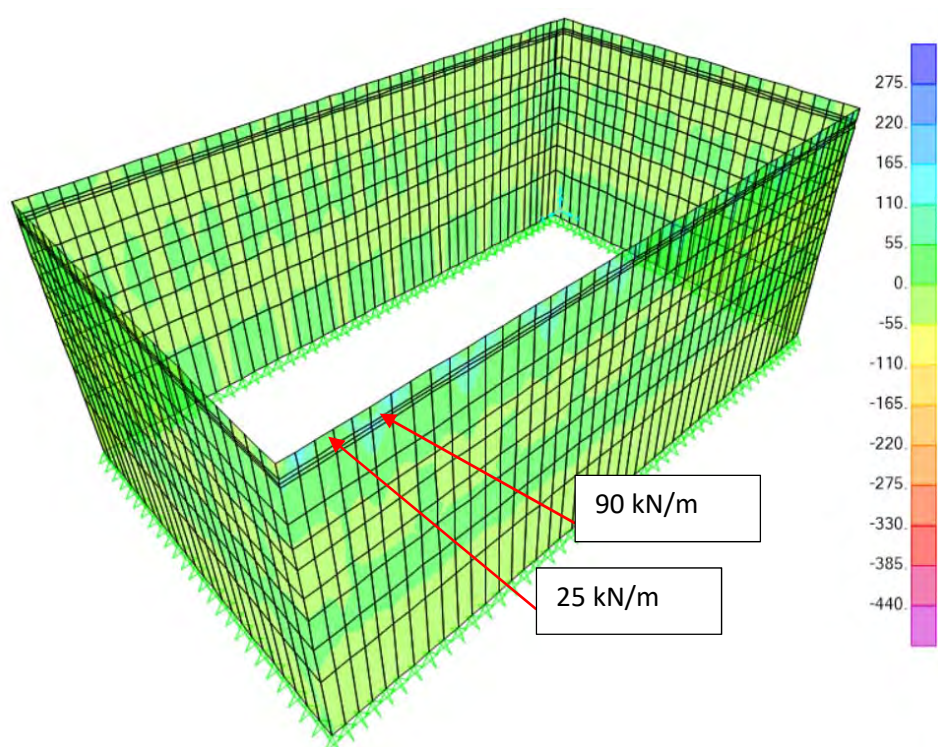


Figura 112 – V23 ELU Cresta de la ola

### 2.1.2. Paredes interiores

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje horizontal:

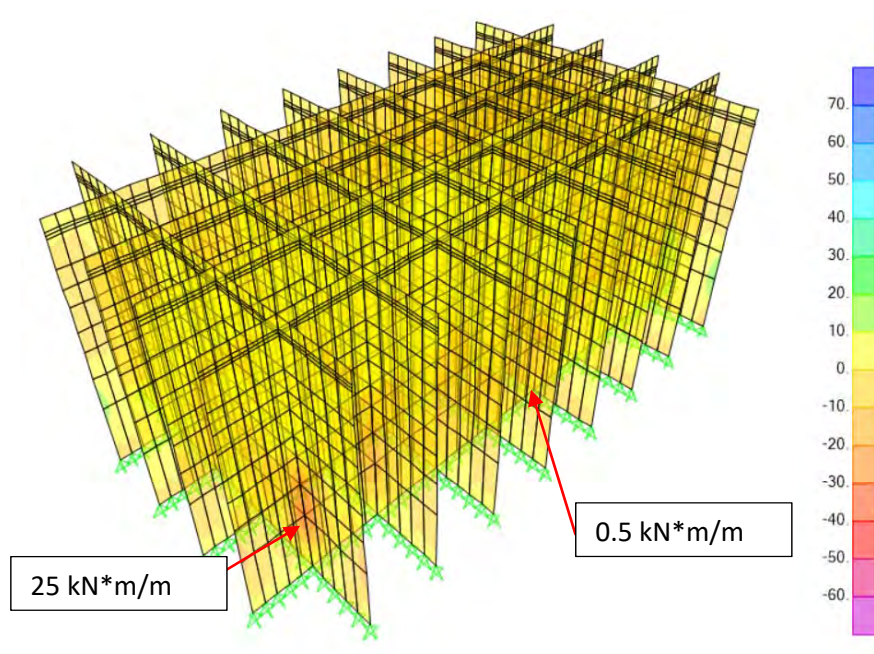


Figura 113 – M22 ELU Flotación

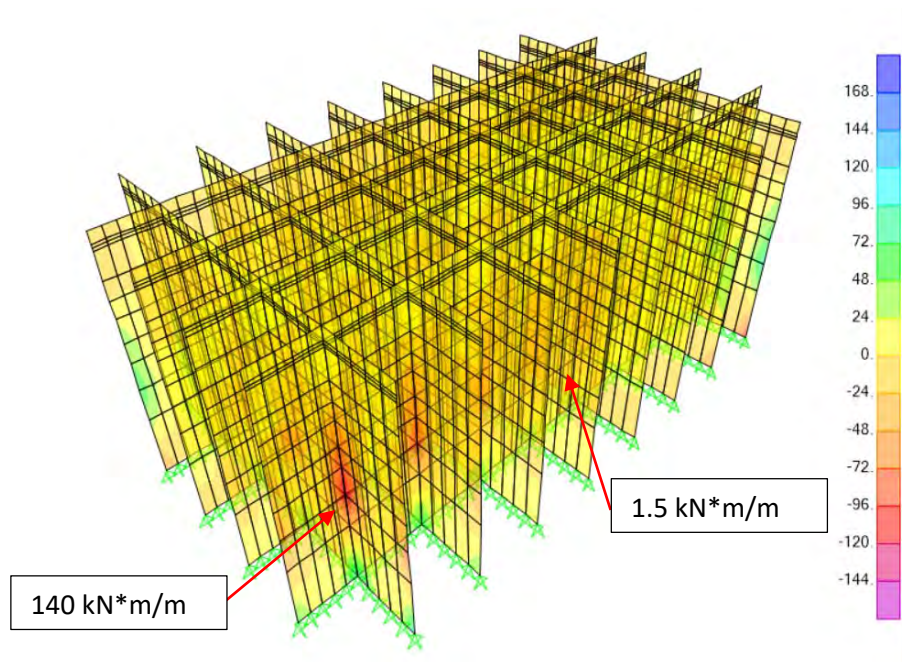


Figura 114 – M22 ELU Fondeo

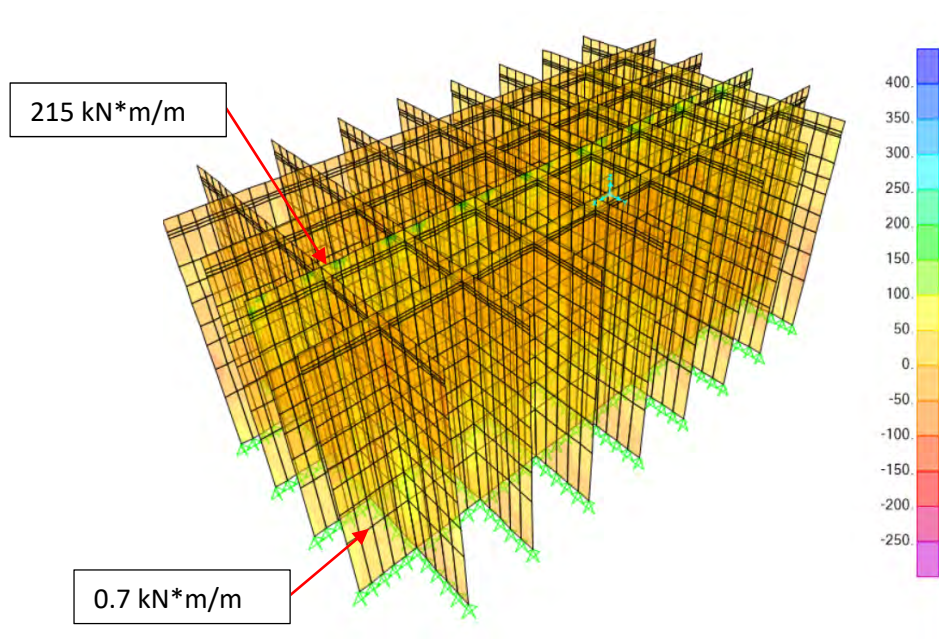


Figura 115 – M22 ELU Seno de la ola



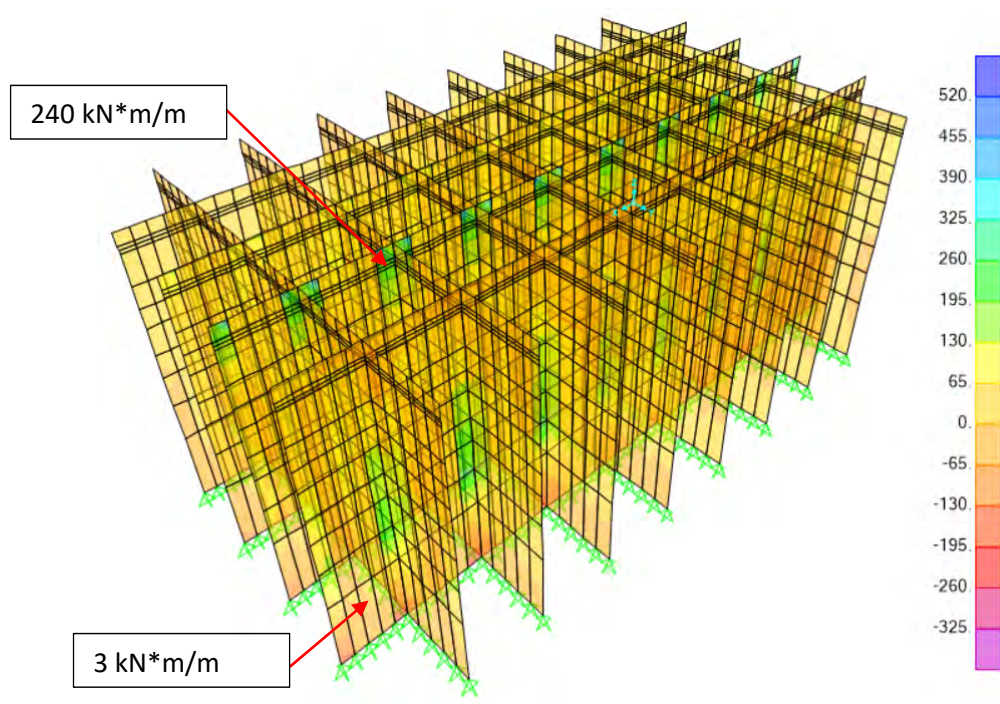


Figura 116 – M22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje vertical:

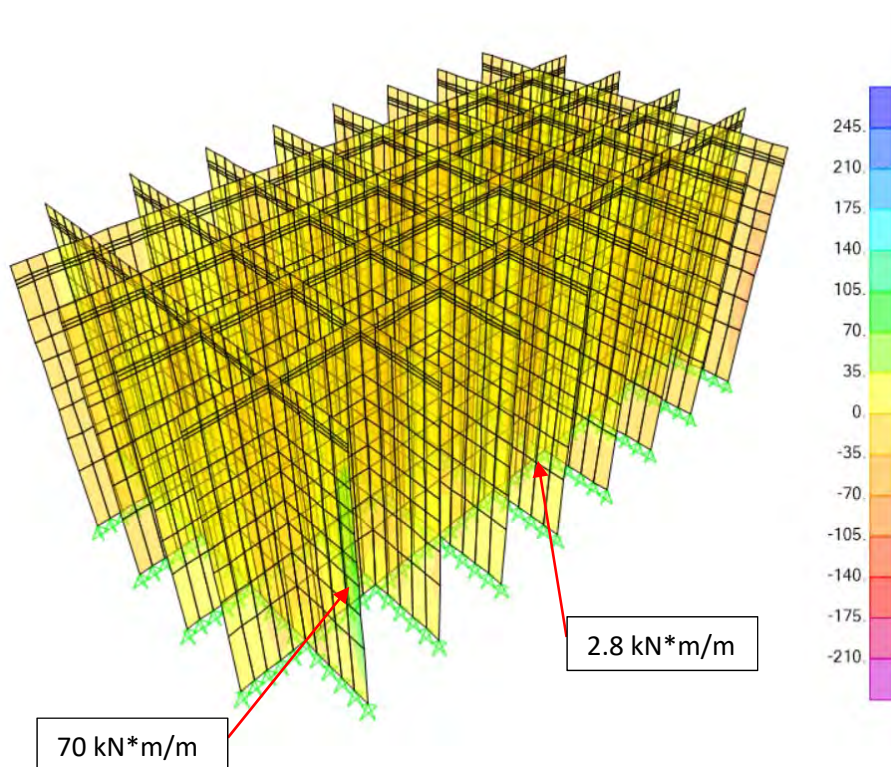


Figura 117 – M11 ELU Fondeo

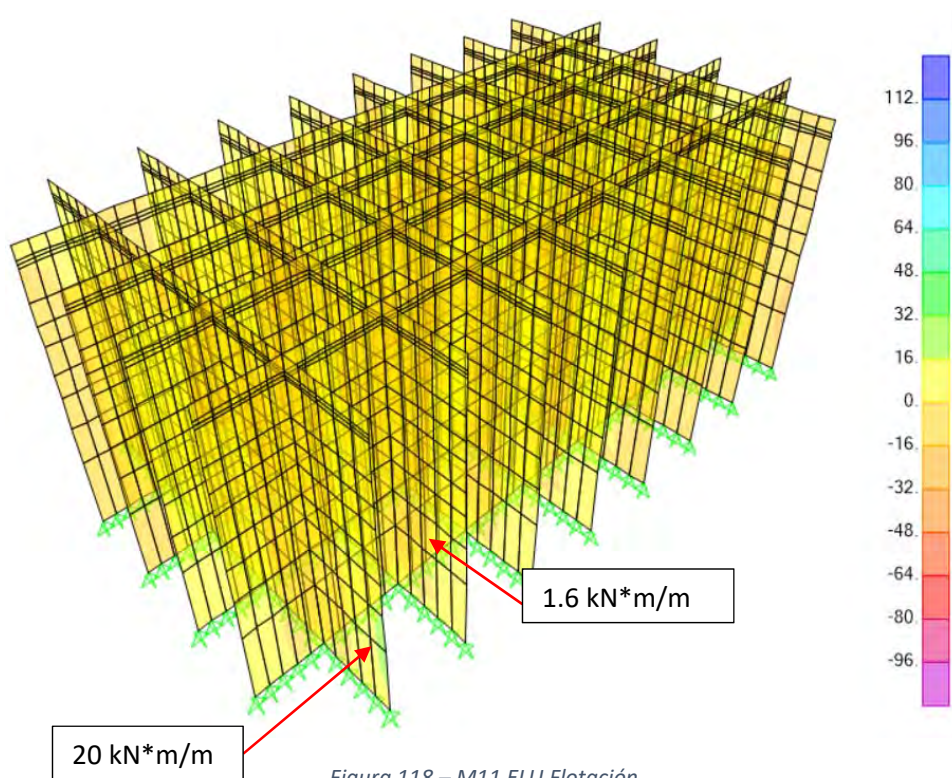


Figura 118 – M11 ELU Flotación

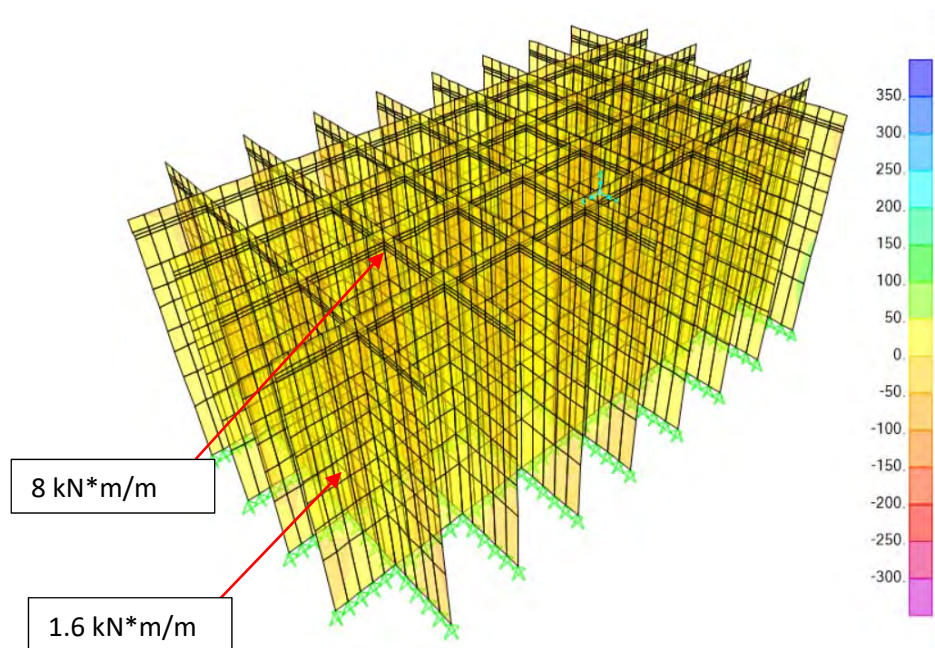
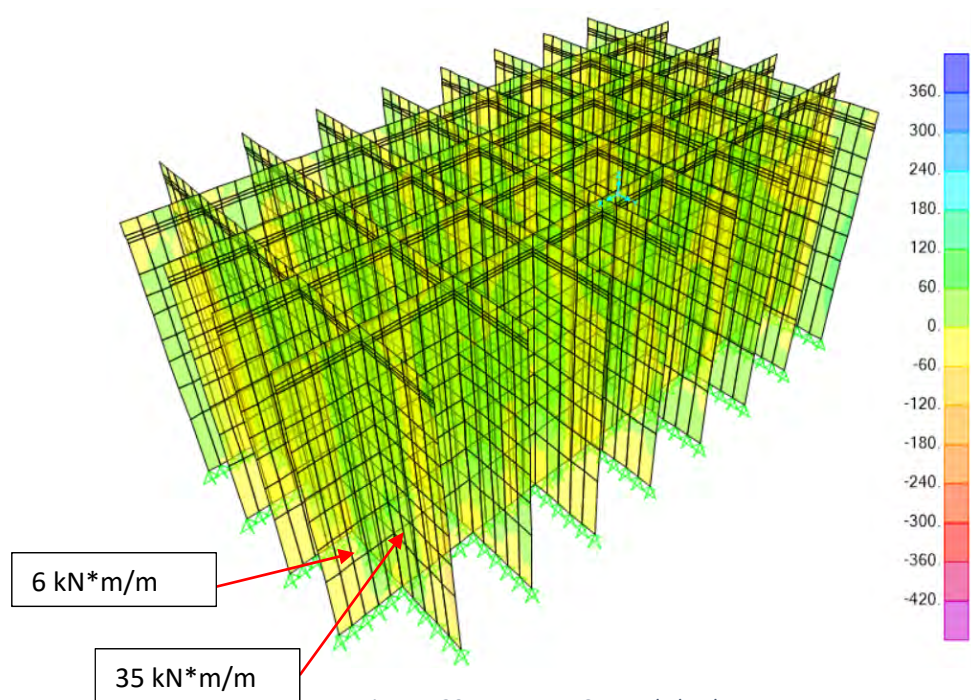
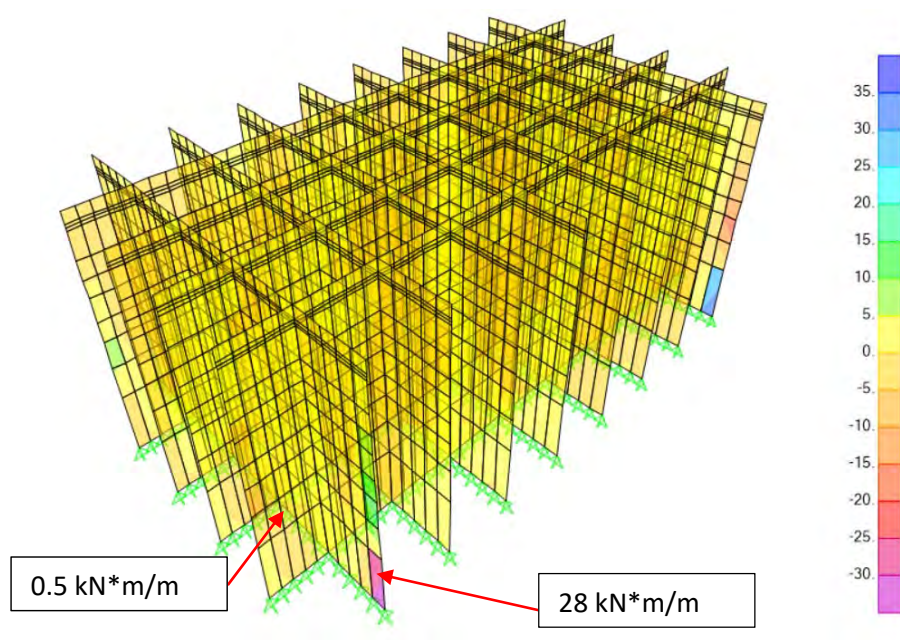


Figura 119 – M11 ELU Seno de la ola





Los resultados para las paredes interiores del momento torsor M12:





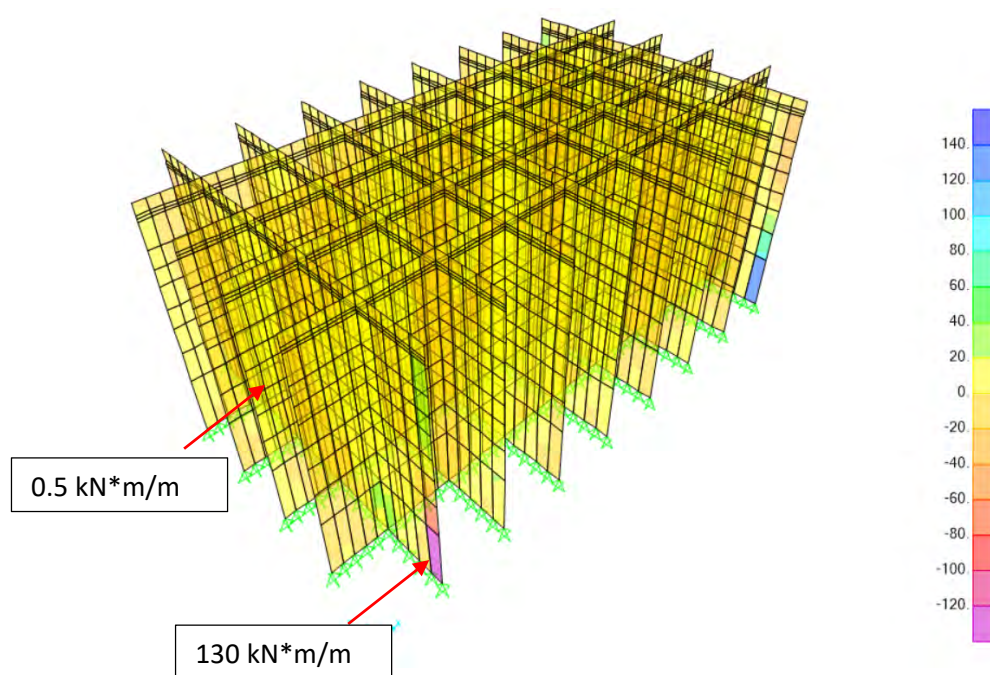


Figura 122 – M12 ELU Fondeo

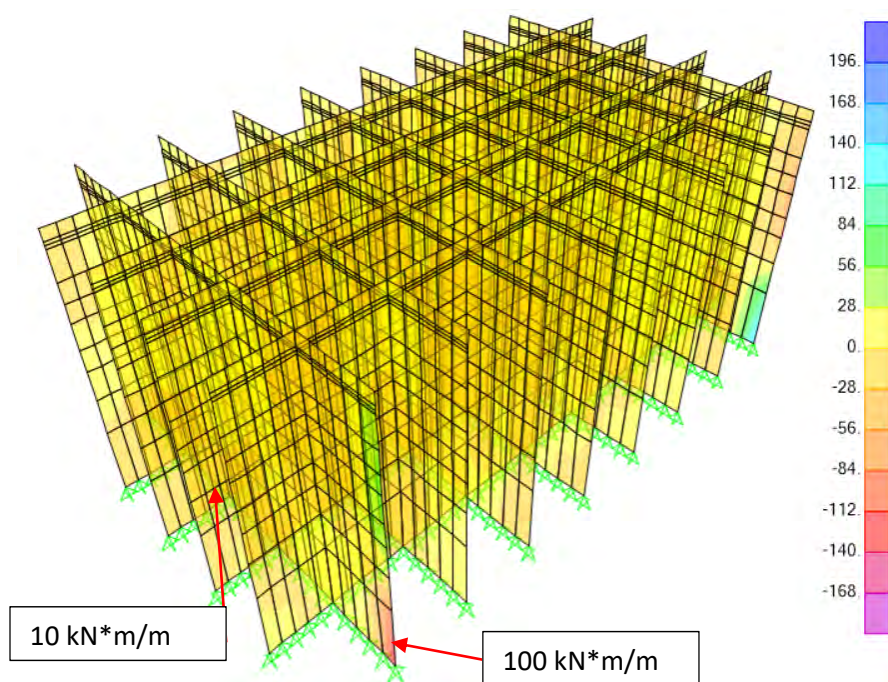


Figura 123 – M12 ELU Seno de la ola

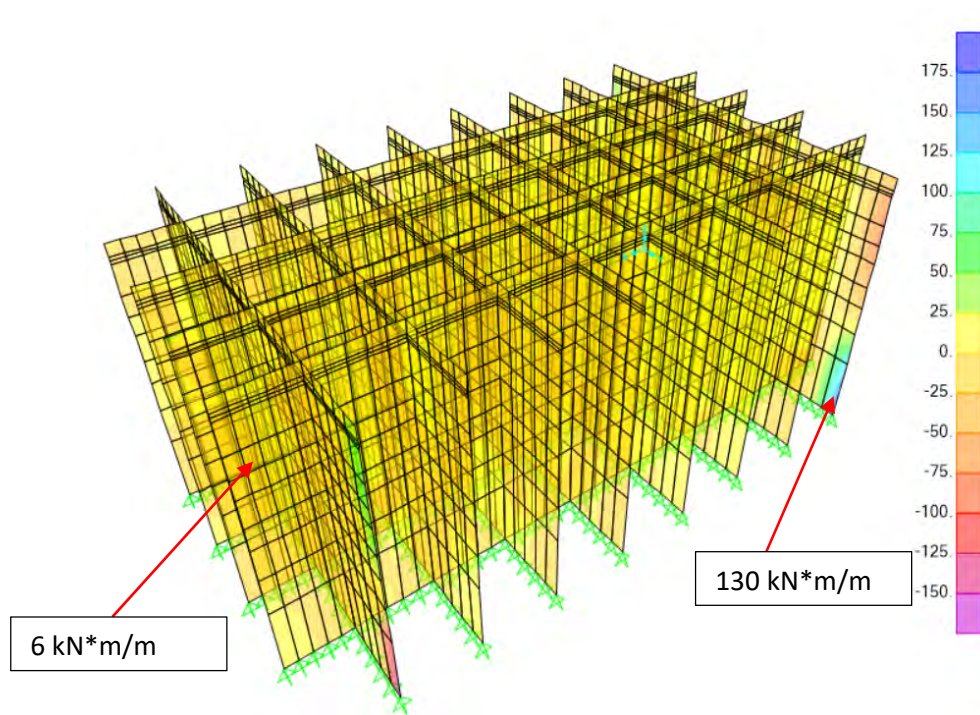


Figura 124 – M12 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje horizontal:

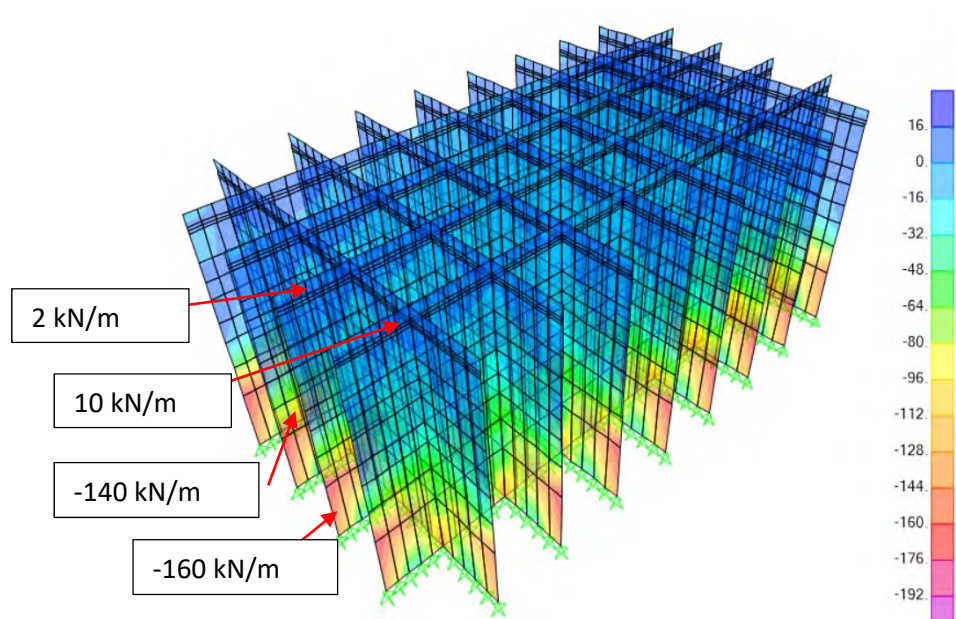
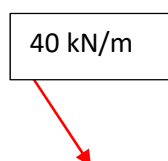


Figura 125 – F11 ELU Flotación





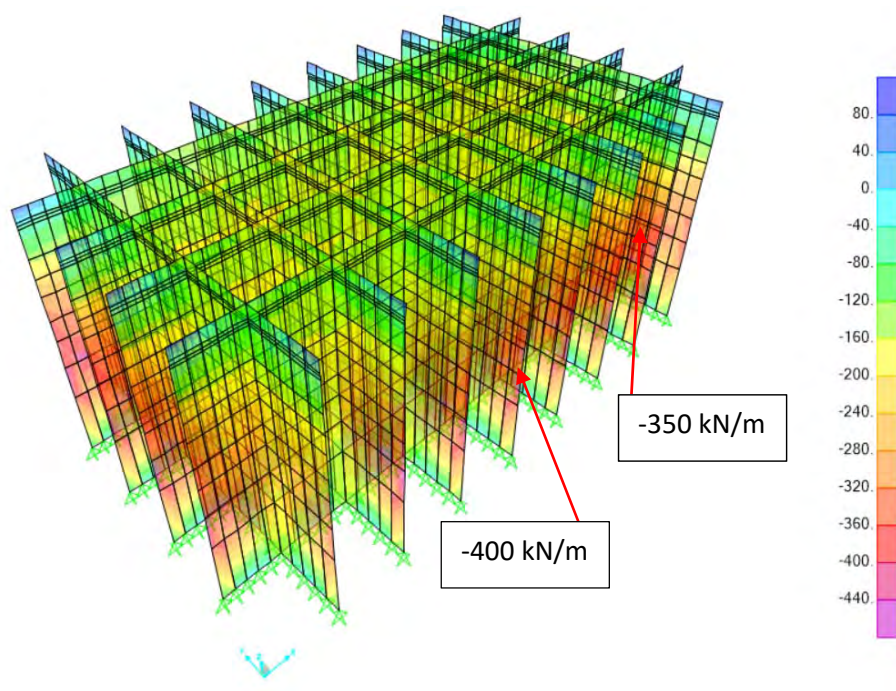


Figura 126 – F11 ELU Fondeo

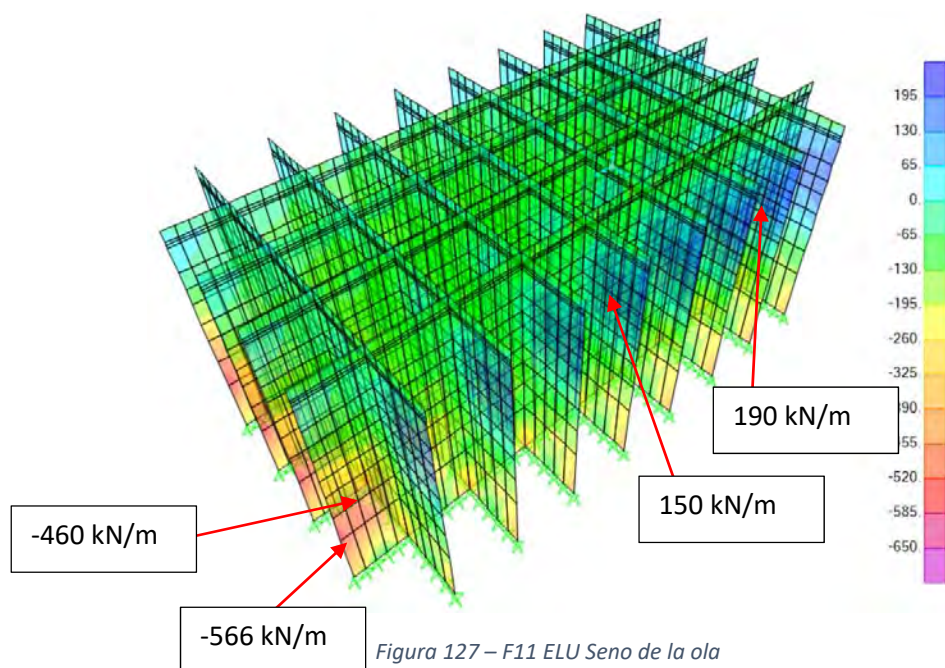


Figura 127 – F11 ELU Seno de la ola



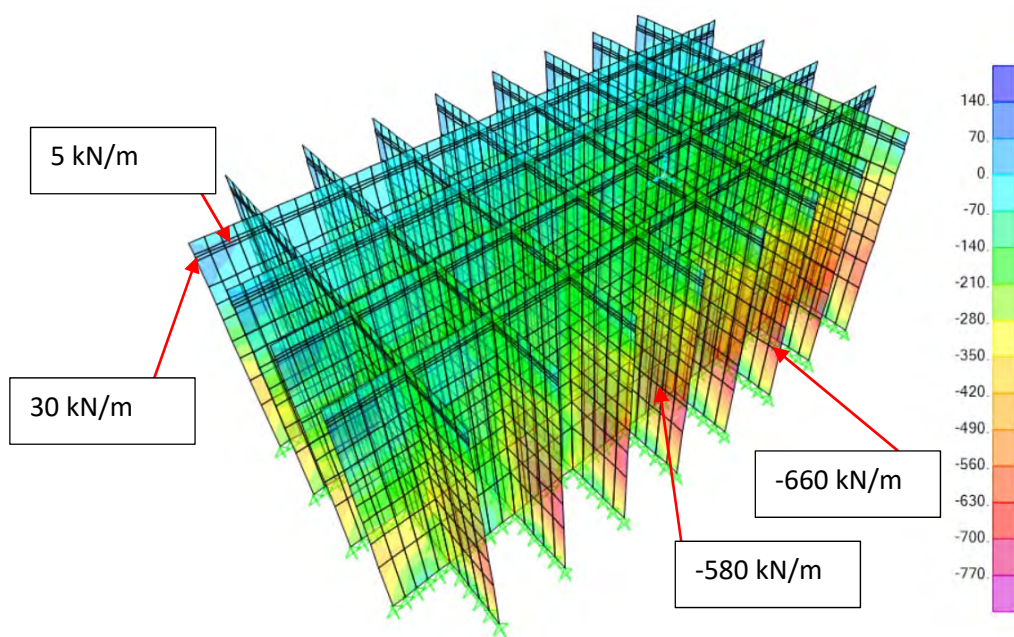


Figura 128 – F11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje vertical:

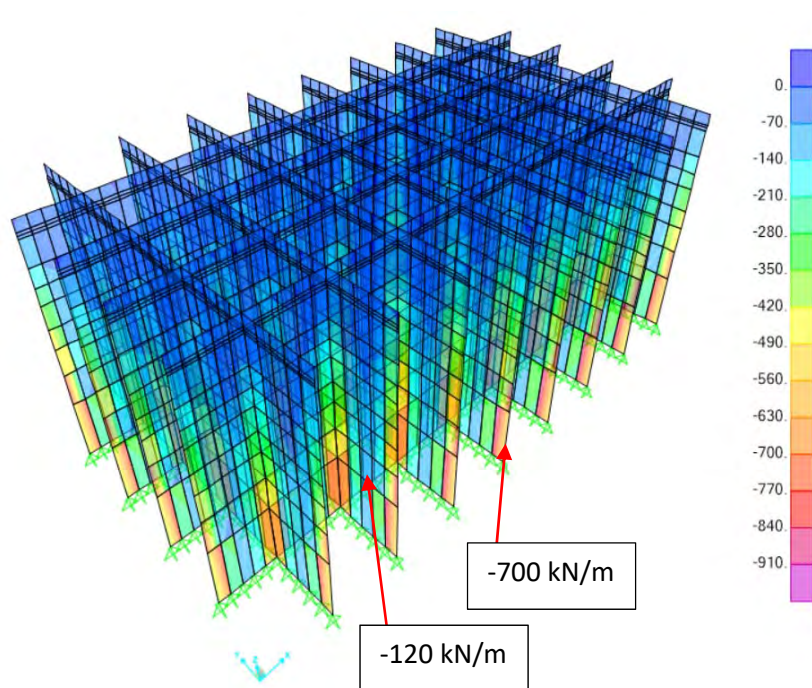


Figura 129 – F22 ELU Fondo

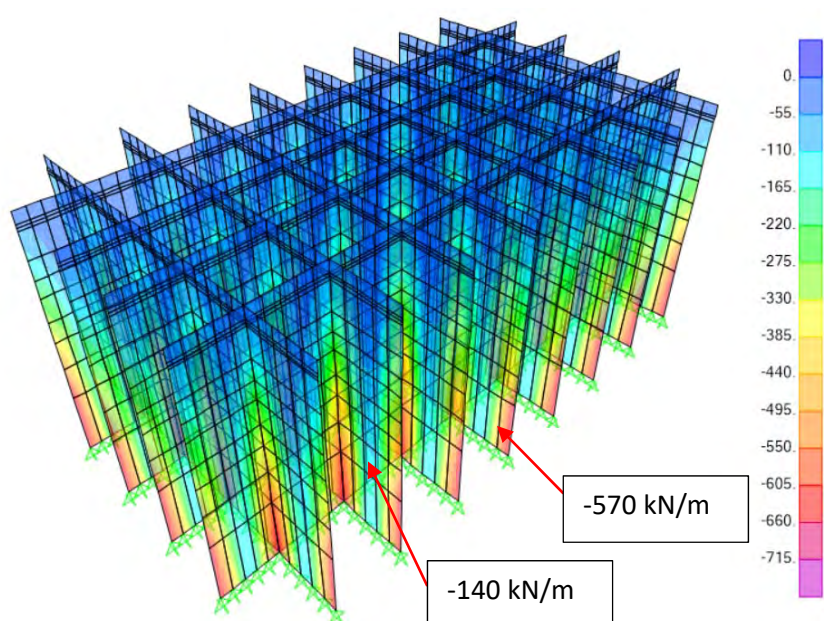


Figura 130 – F22 ELU Flotación

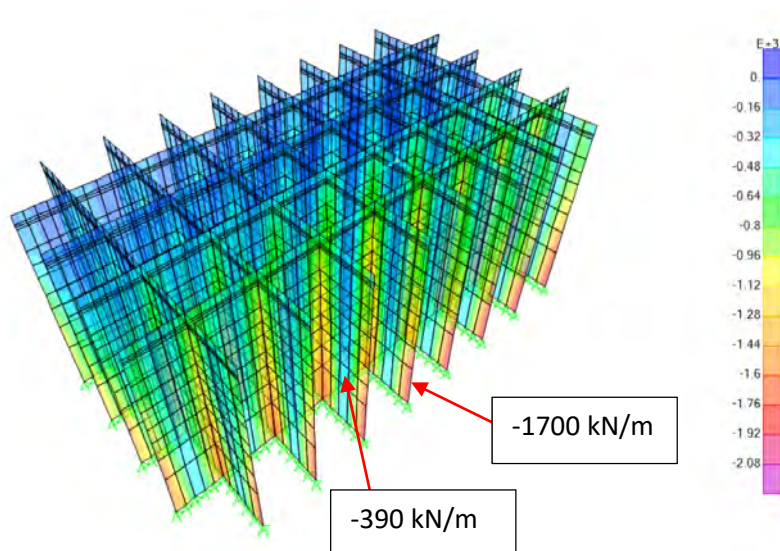


Figura 131 – F22 ELU Seno de la ola

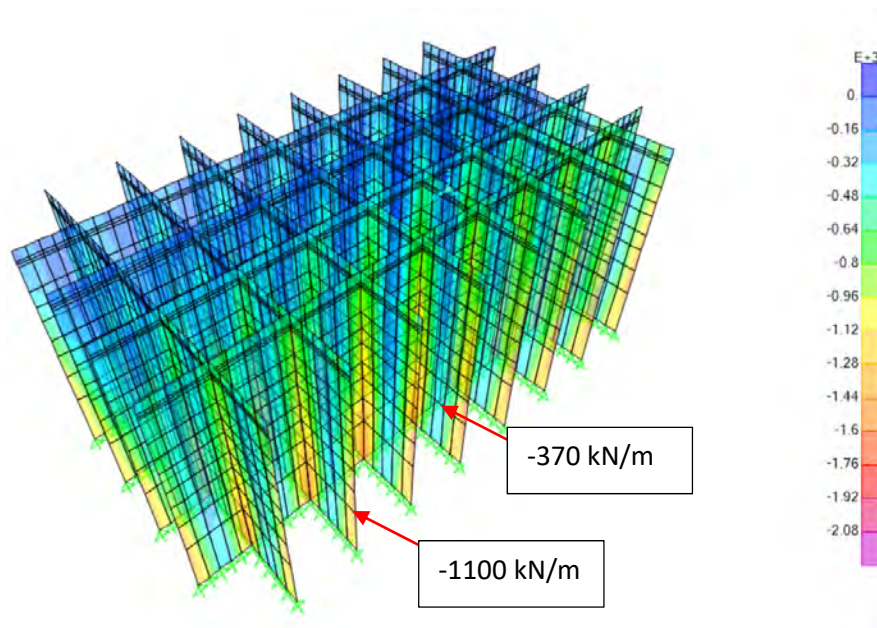


Figura 132 – F22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del cortante V13:

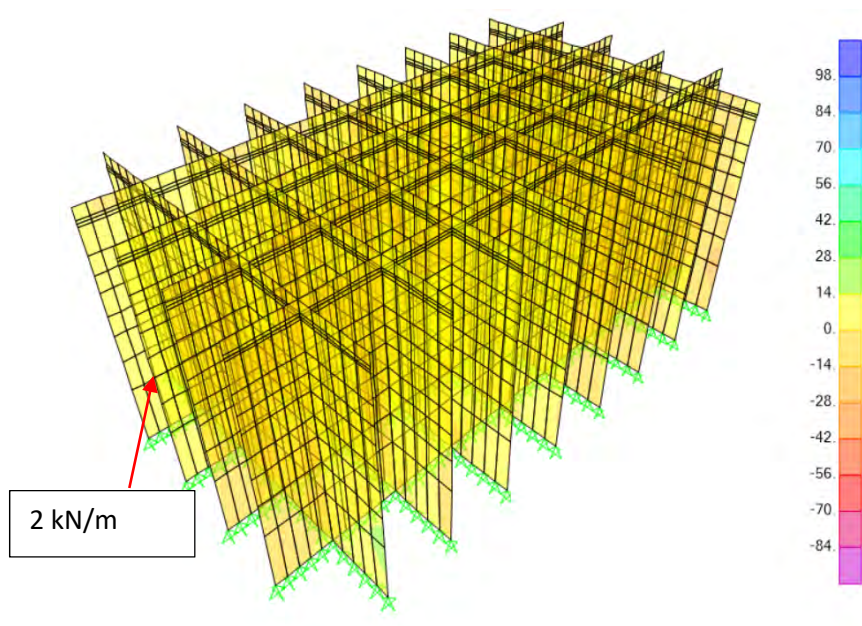


Figura 133 – V13 ELU Flotación



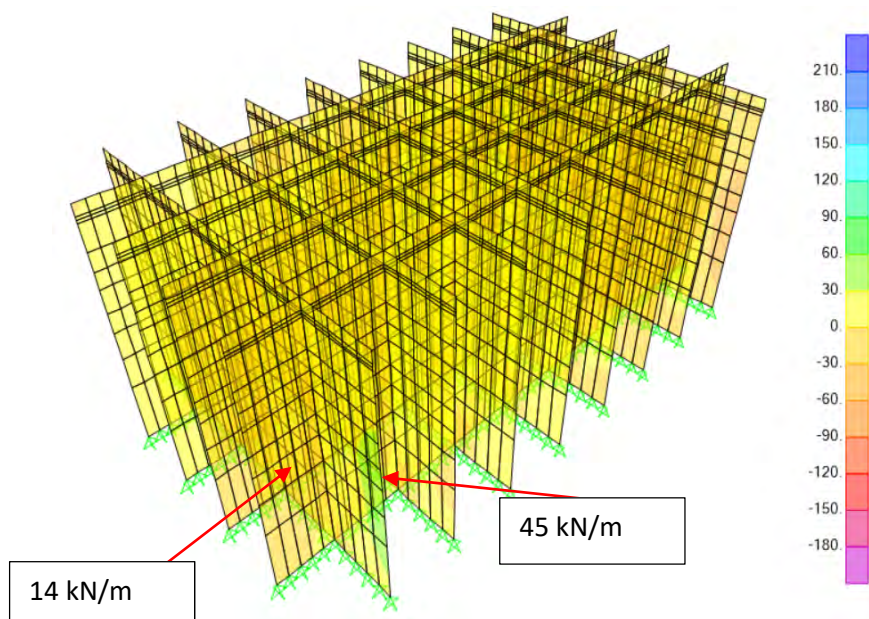


Figura 134 – V13 ELU Fondeo

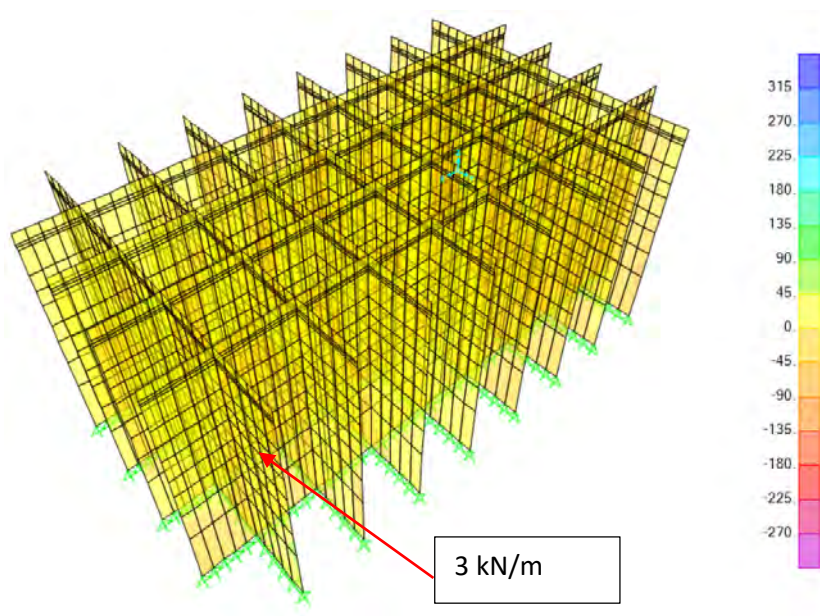


Figura 135 – V13 ELU Seno de la ola

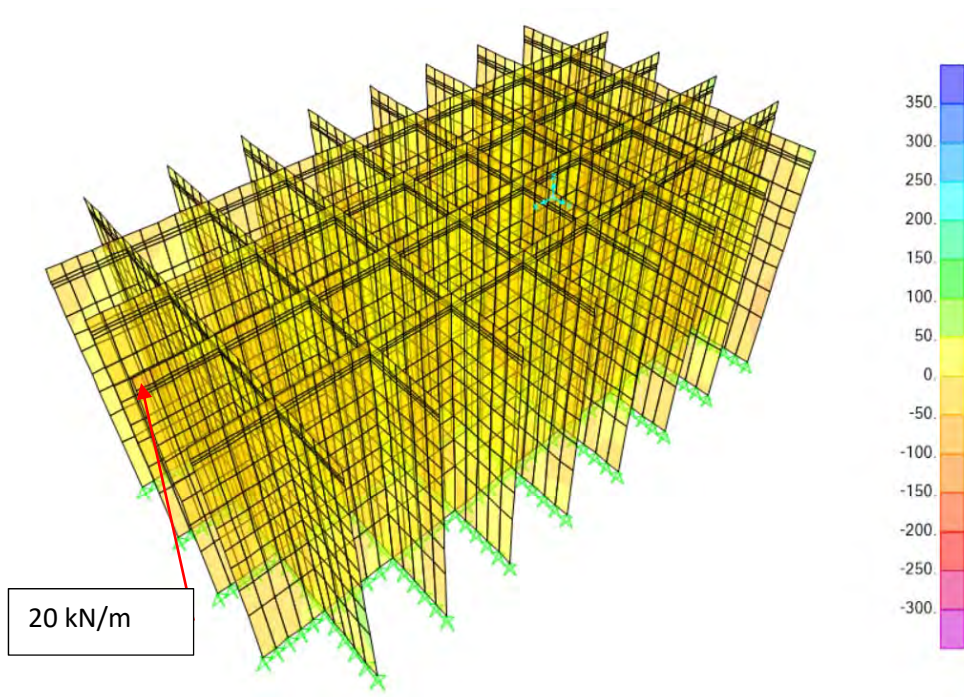


Figura 136 – V13 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del cortante V23:

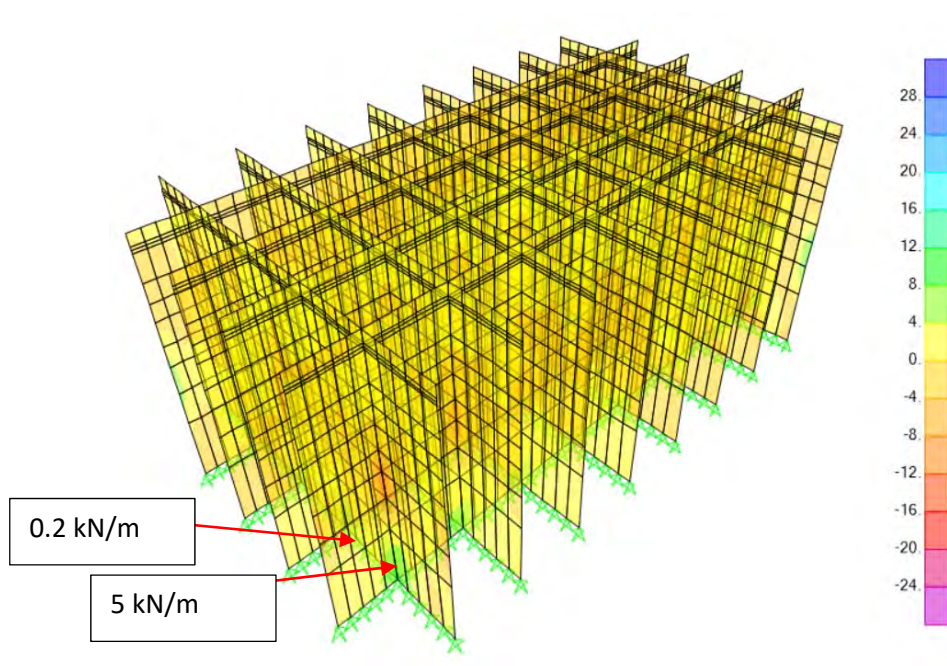


Figura 137 – V23 ELU Flotación



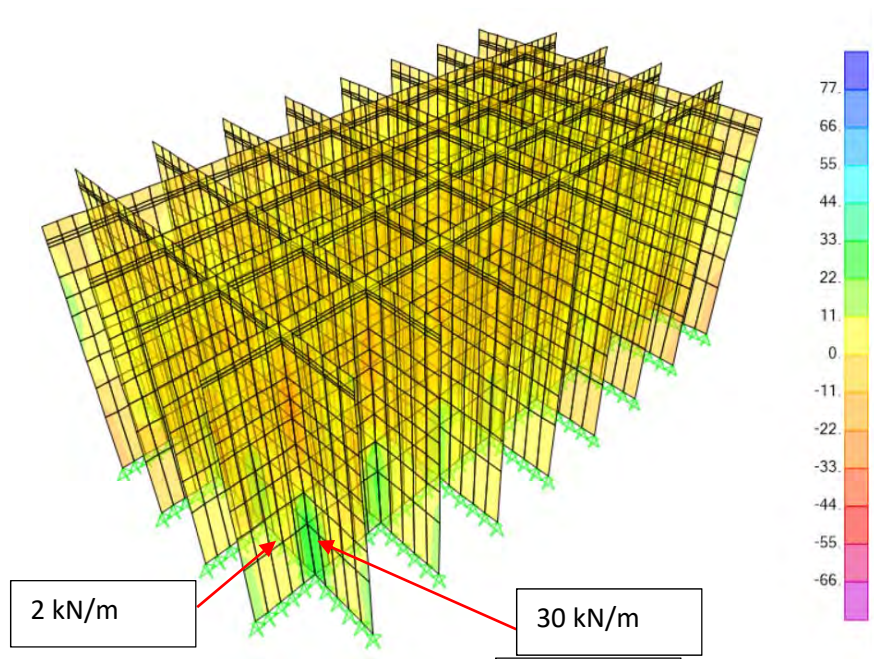


Figura 138 – V23 E

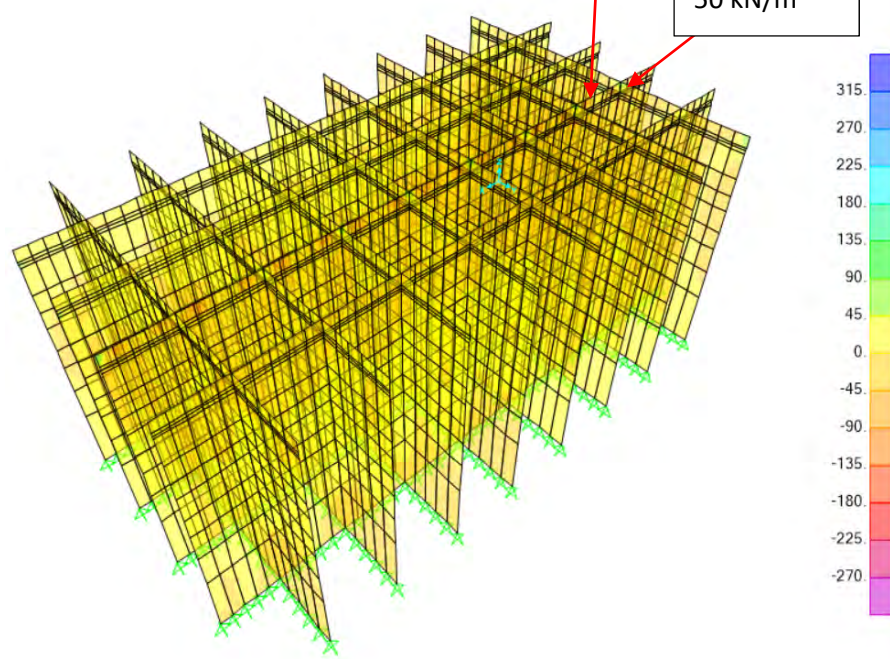


Figura 139 – V23 ELU Seno de la ola



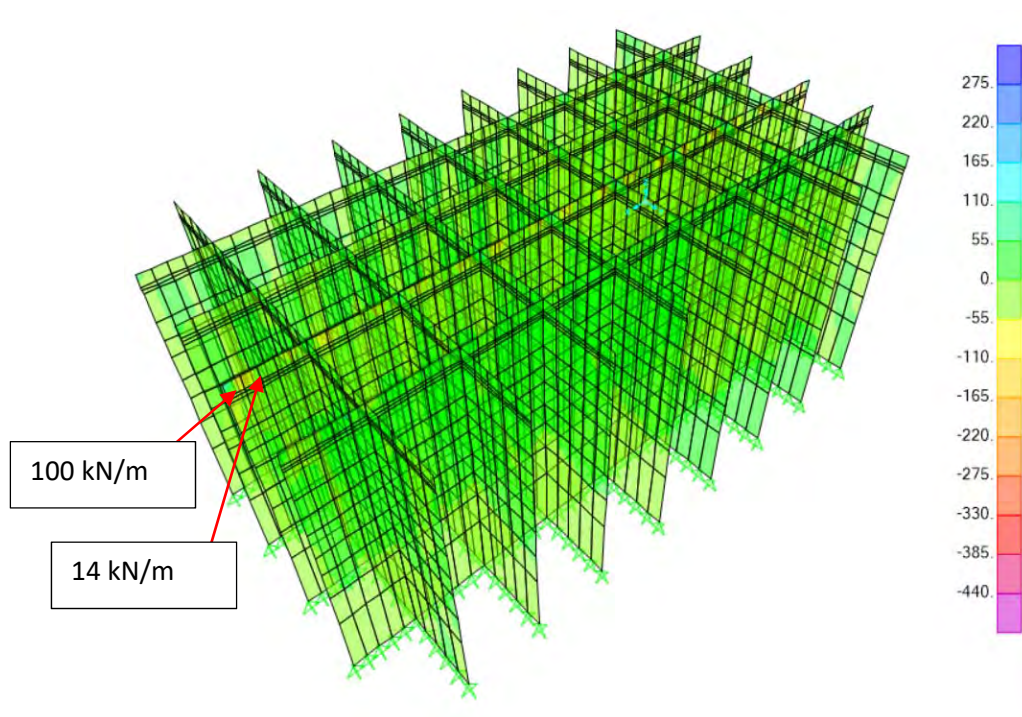


Figura 140 – V23 ELU Cresta de la ola

### 2.1.3. Resumen ELU celdas circulares

Paredes exteriores														
	M22 (kN*m/m)		M11 (kN*m/m)		M12 (kN*m/m)		F11 (kN/m)		F22 (kN/m)		V13 (kN/m)		V23 (kN/m)	
	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2
ELU Flotación	31	9	108	10	12	6	5/-80	5/-50	-390	-120	60	8	6	1.8
ELU Fondeo	41	13	230	20	25	8	31/-210	0/-195	-410	-120	135	15	13	2
ELU Cresta de la ola	160	22	440	40	30	3.5	30/-270	12/-240	-990	-290	260	30	90	25
ELU Seno de la ola	114	7	340	31	80	8	65/-290	30/-240	-1150	-390	190	26	30	2

Paredes interiores														
	M22 (kN*m/m)		M11 (kN*m/m)		M12 (kN*m/m)		F11 (kN/m)		F22 (kN/m)		V13 (kN/m)		V23 (kN/m)	
	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2
ELU Flotación	25	0.5	20	1.6	28	0.5	10/-160	2/-140	-570	-140	2	2	5	0.2
ELU Fondeo	140	1.5	70	2.8	130	0.5	40/-400	0/-350	-700	-120	45	14	30	2
ELU Cresta de la ola	240	3	35	6	130	6	30/-660	5/-660	-1100	-370	20	10	100	14
ELU Seno de la ola	215	0.7	8	1.6	100	10	190/-566	150/-460	-1700	-390	3	3	50	13

## 2.2. ELS

### 2.2.1. Paredes exteriores

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje horizontal:

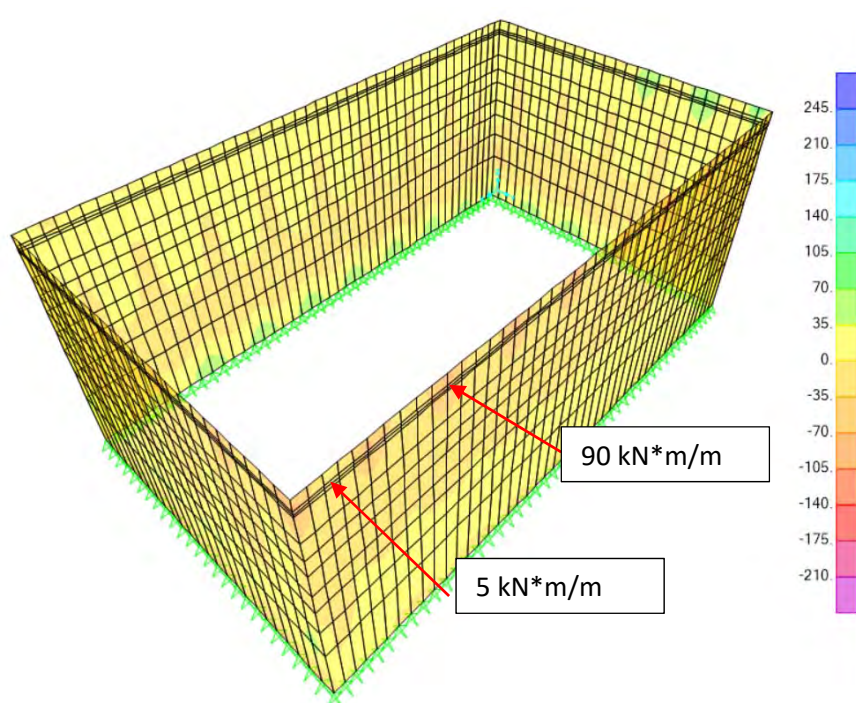


Figura 141 – M22 ELS Seno de la ola

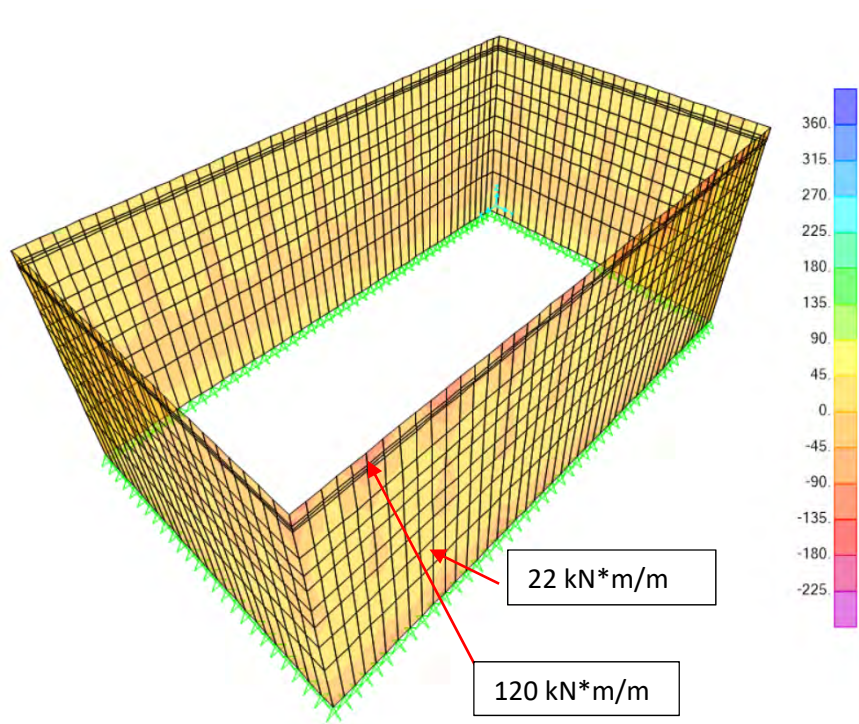


Figura 142 – M22 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje vertical:

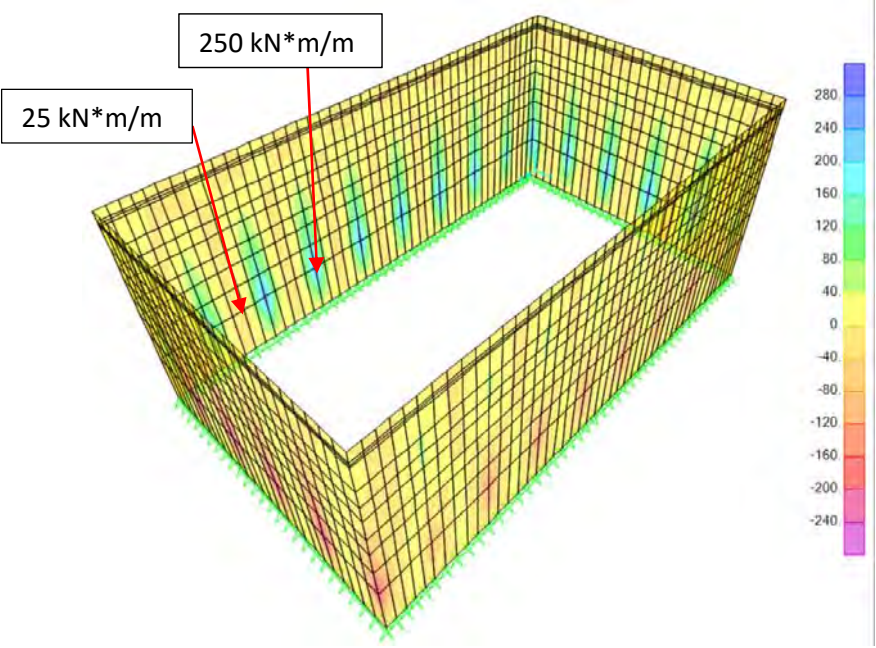


Figura 143 – M11 ELS Seno de la ola

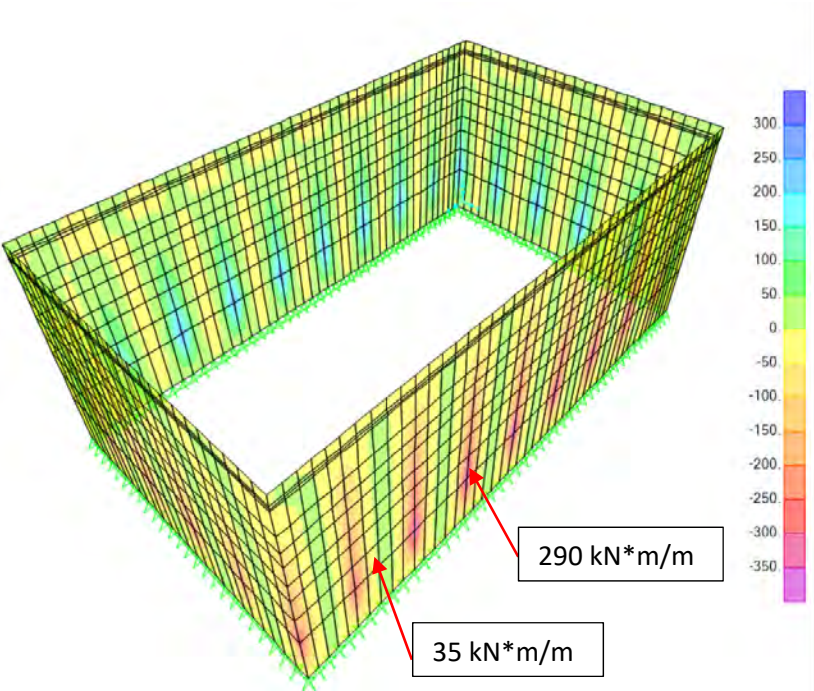


Figura 144 – M11 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes exteriores del momento torsor M12:

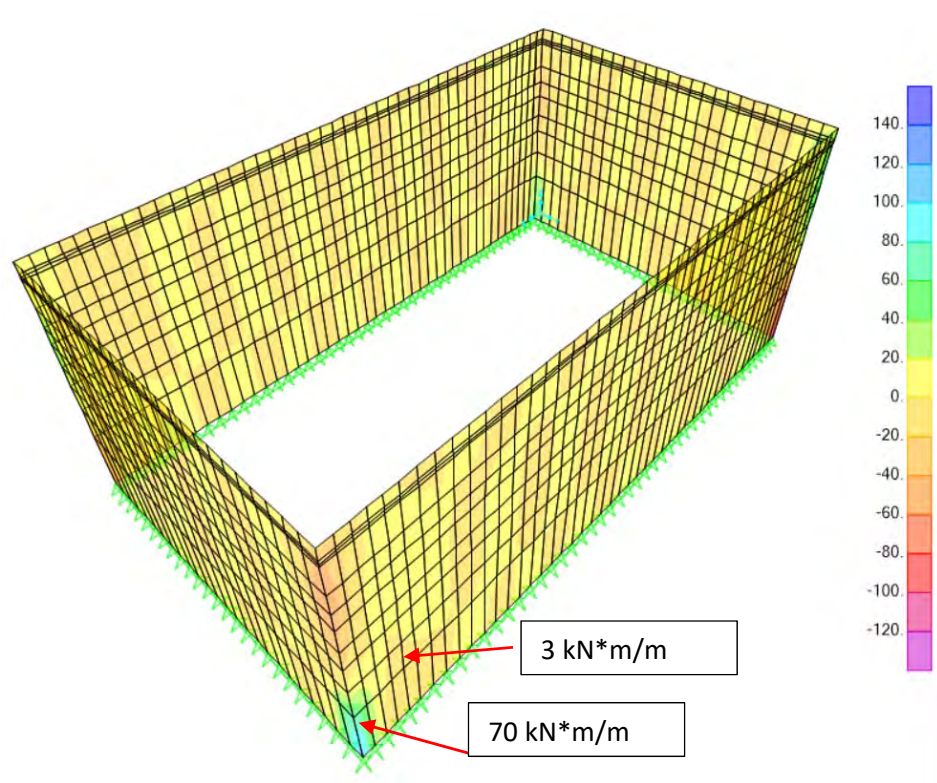


Figura 145 – M12 ELS Seno de la ola

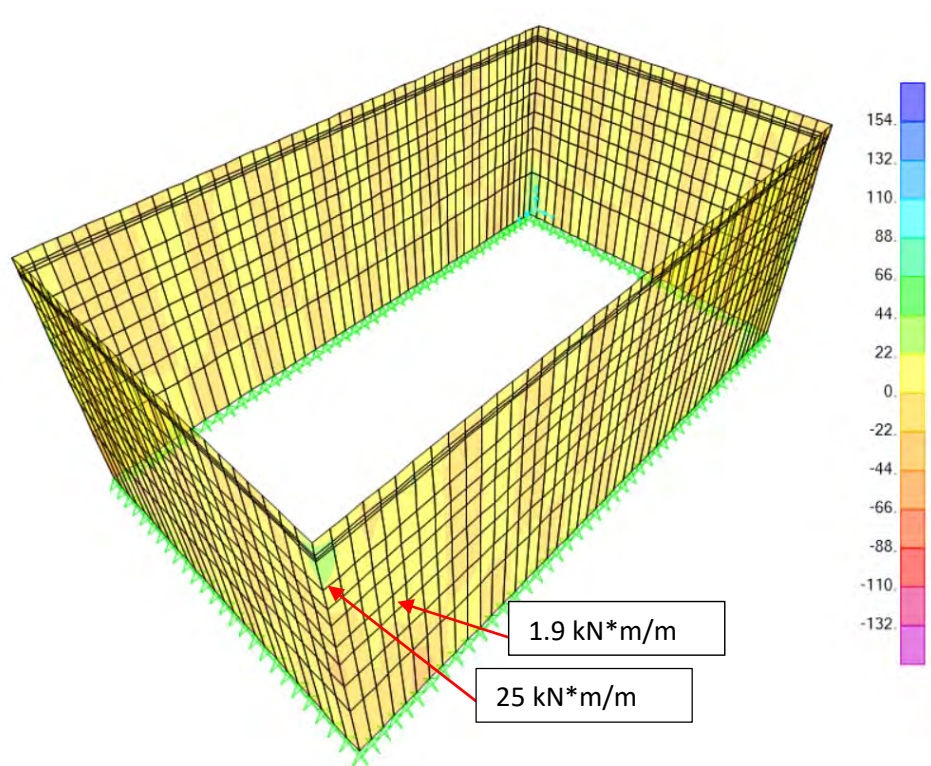


Figura 146 – M12 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje horizontal:

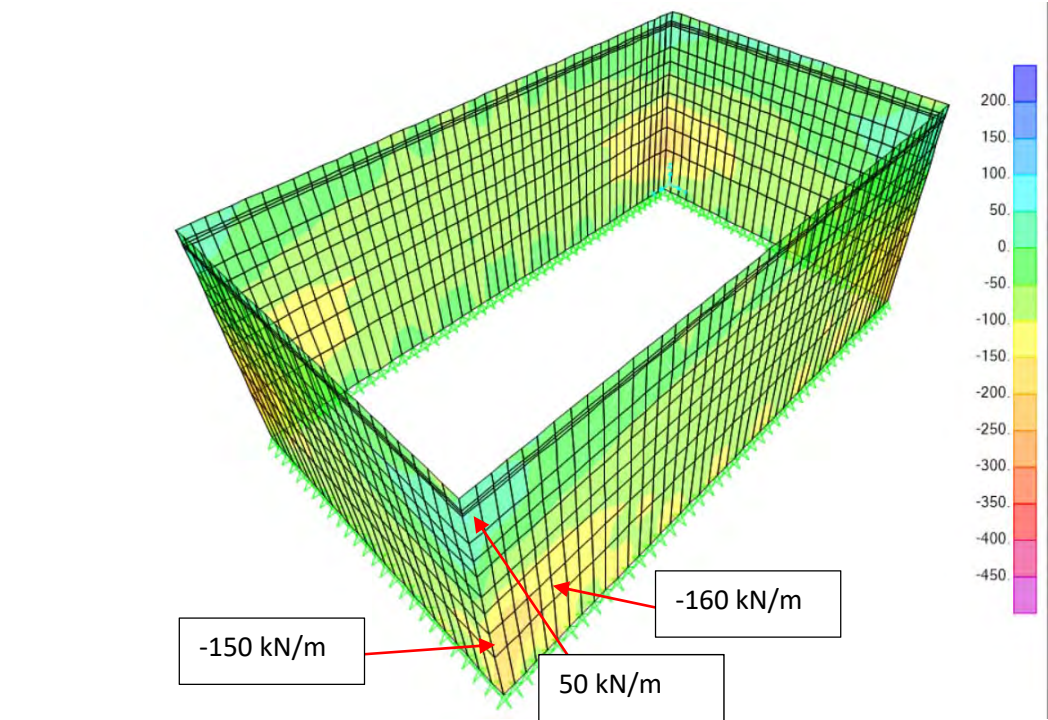


Figura 147 – F11 ELS Seno de la ola

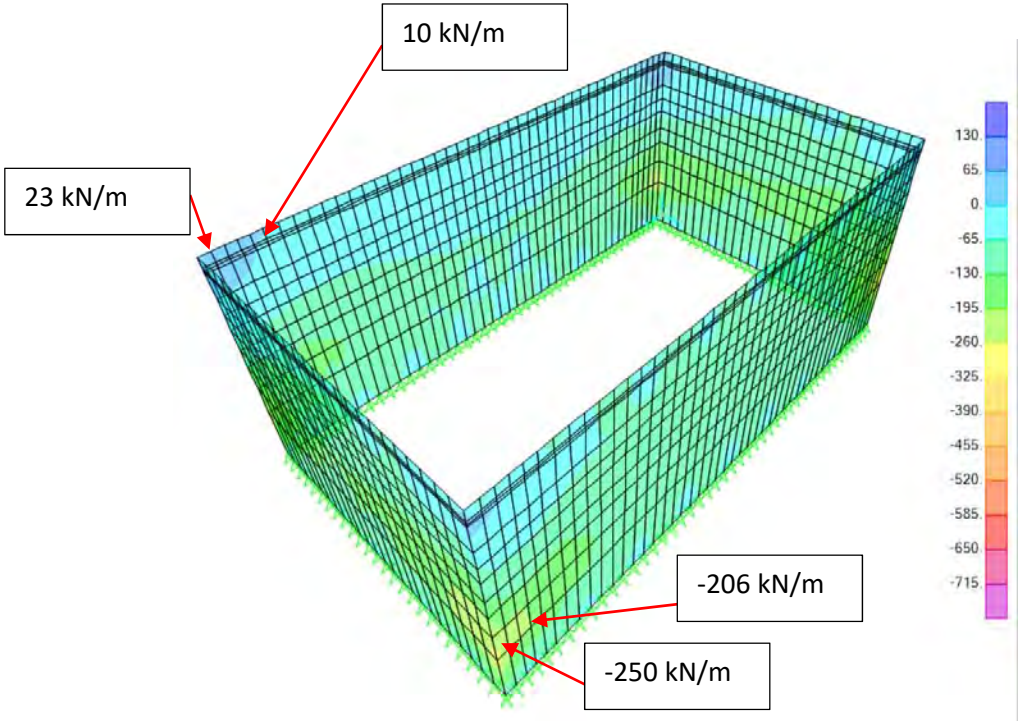


Figura 148 – F11 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje vertical:

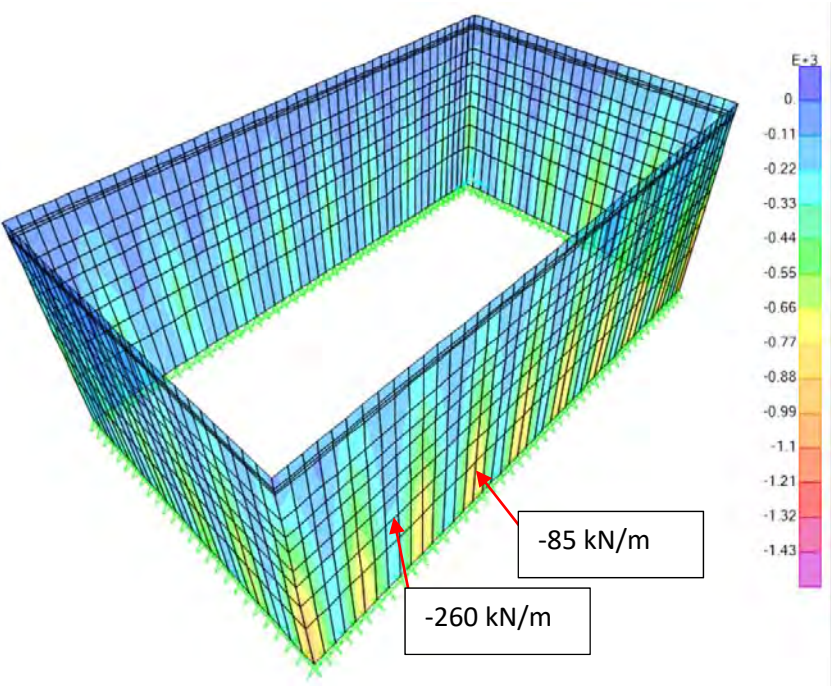


Figura 149 – F22 ELS Seno de la ola

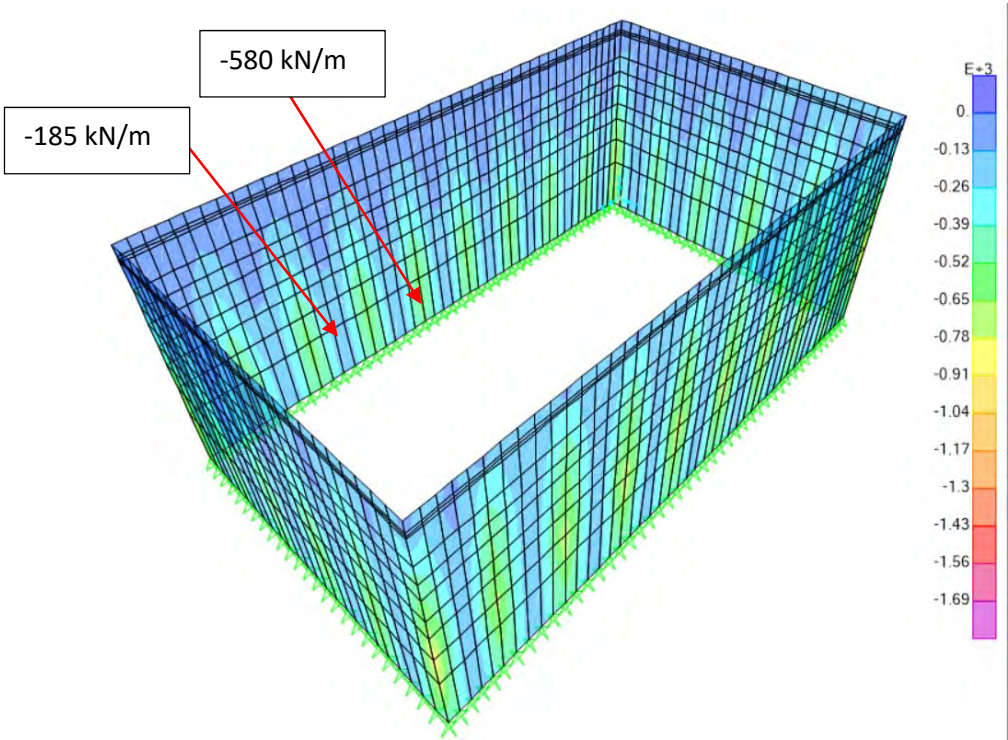


Figura 150 – F22 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes exteriores del cortante V13:

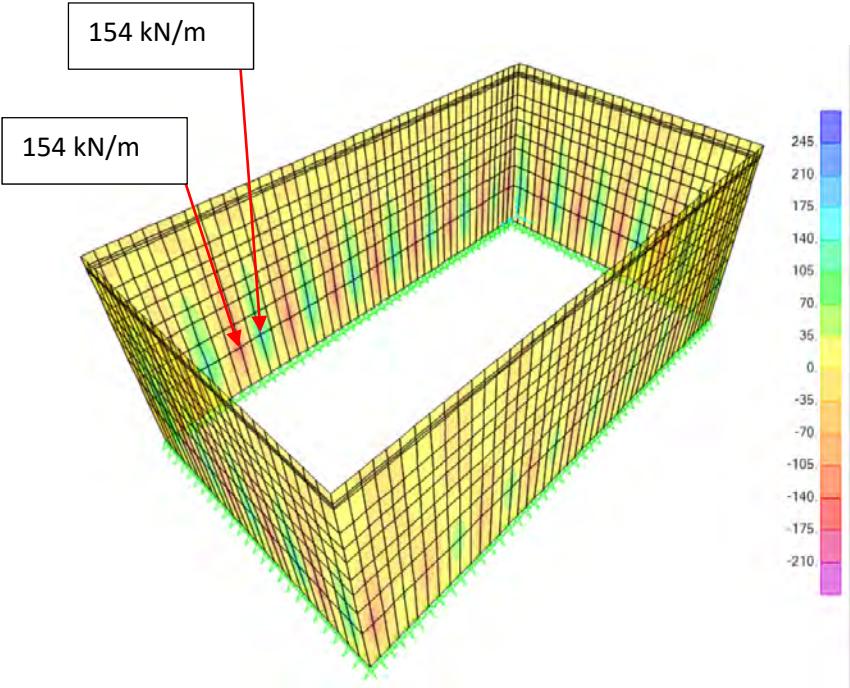


Figura 151 – V13 ELS Seno de la ola

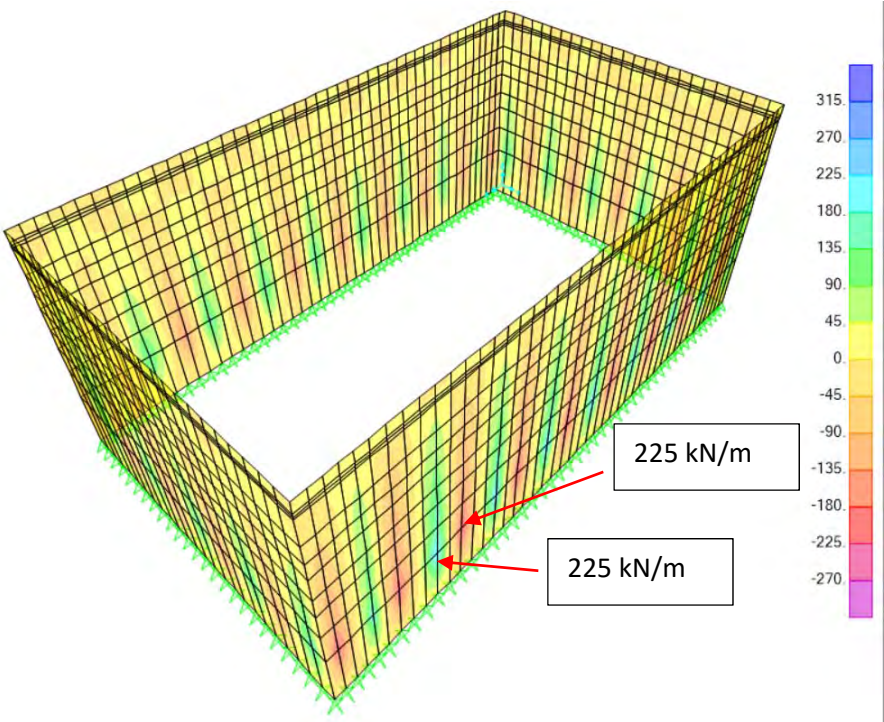


Figura 152 – V13 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V23:

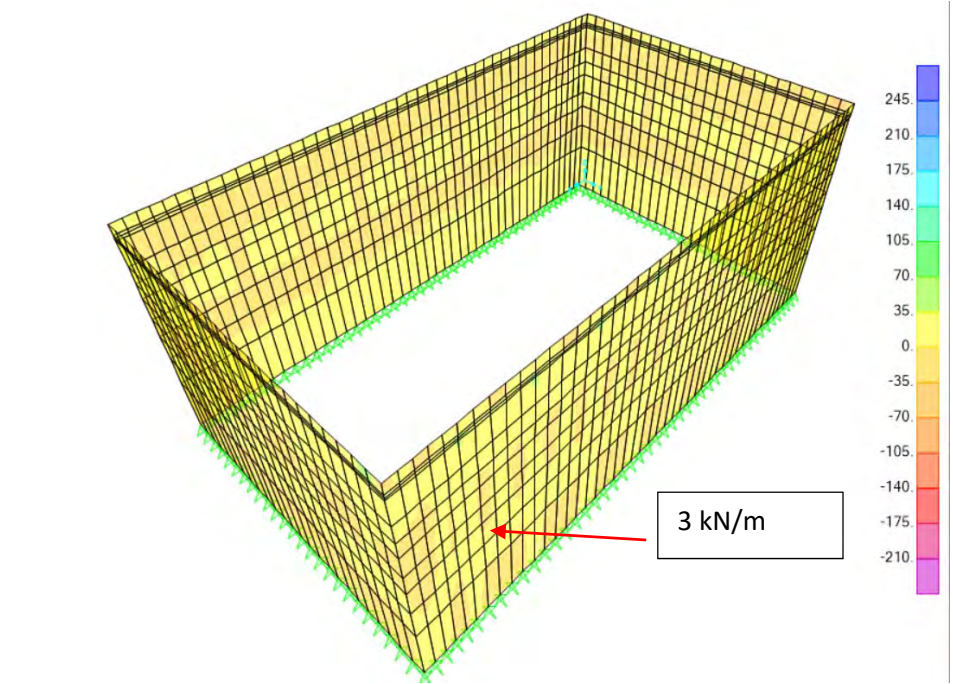


Figura 153 – V23 ELS Seno de la ola

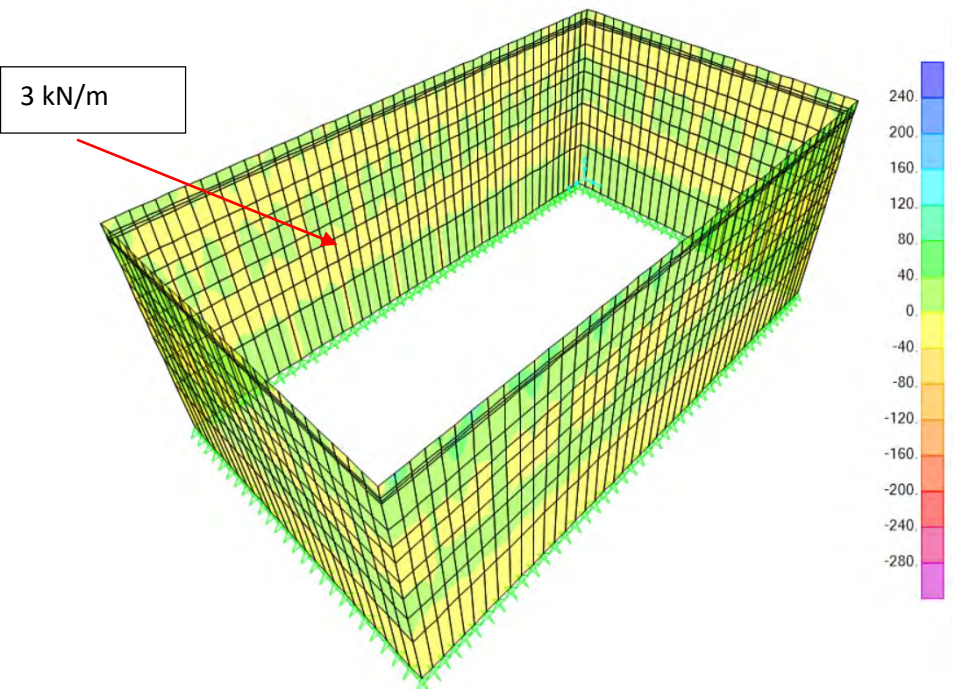


Figura 154 – V23 ELS Cresta de la ola



### 2.2.2. Paredes interiores

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje horizontal:

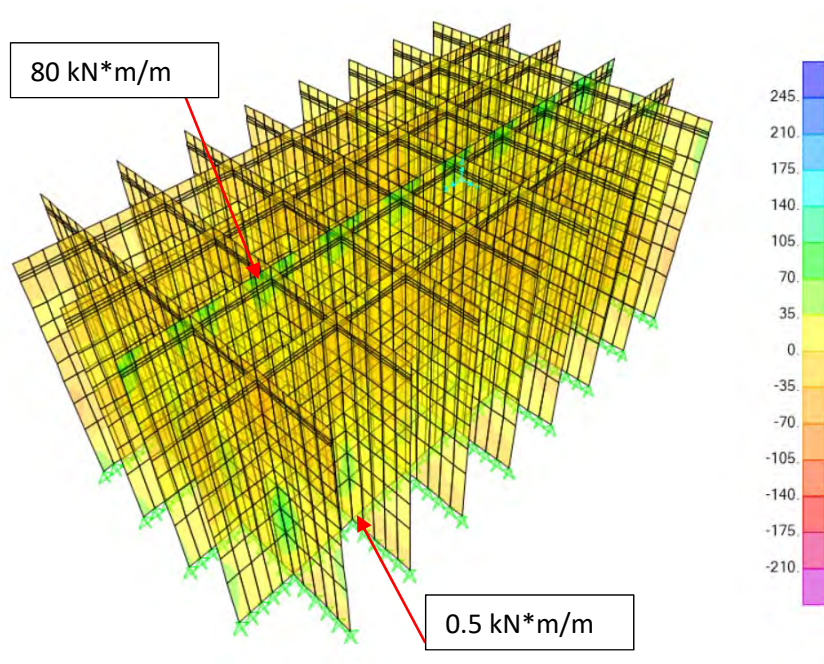


Figura 155 – M22 ELS Seno de la ola

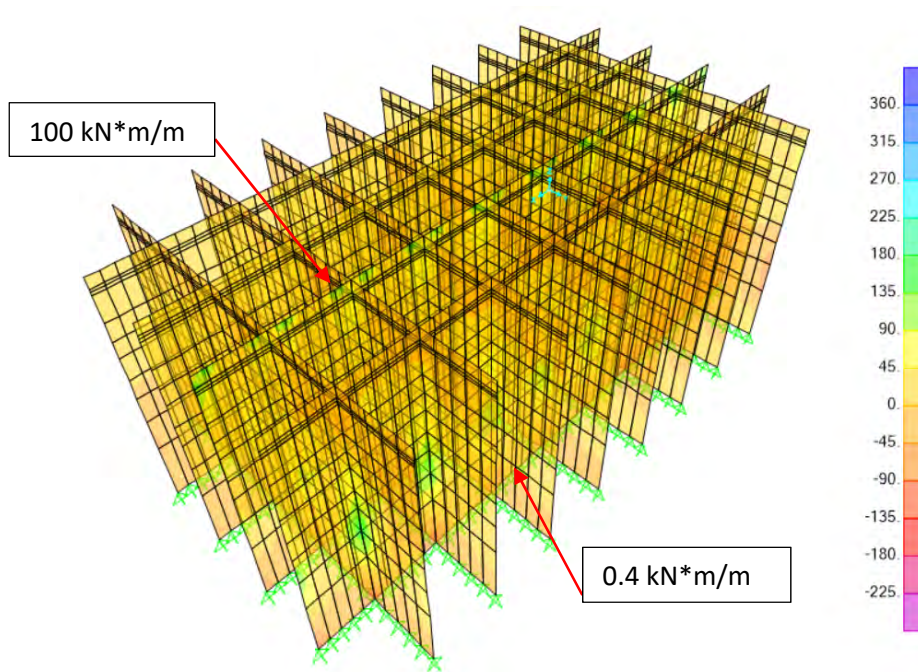


Figura 156 – M22 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje vertical:

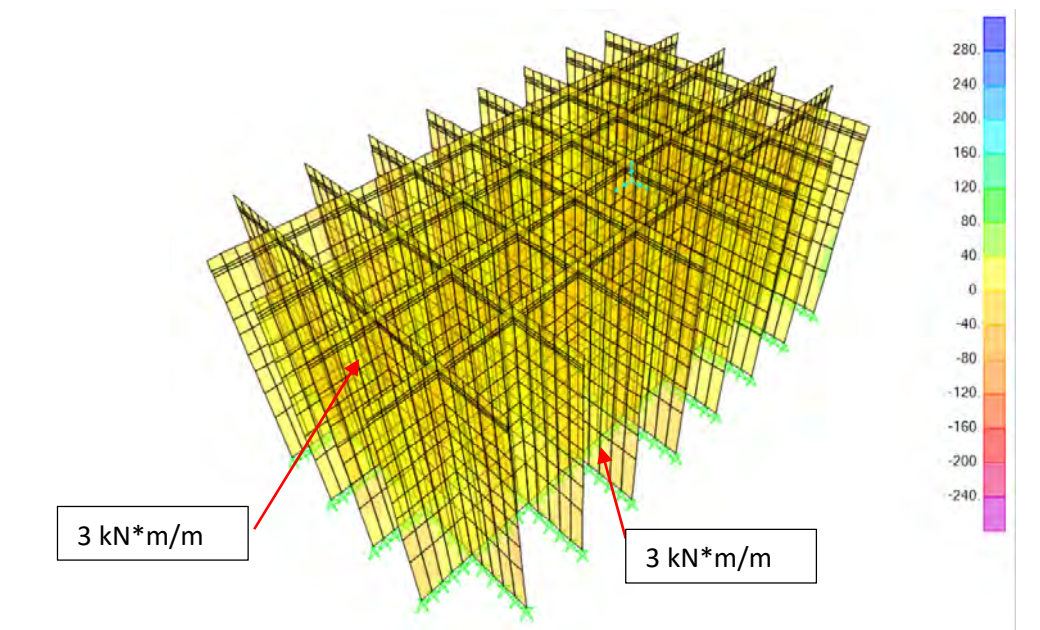


Figura 157 – M11 ELS Seno de la ola

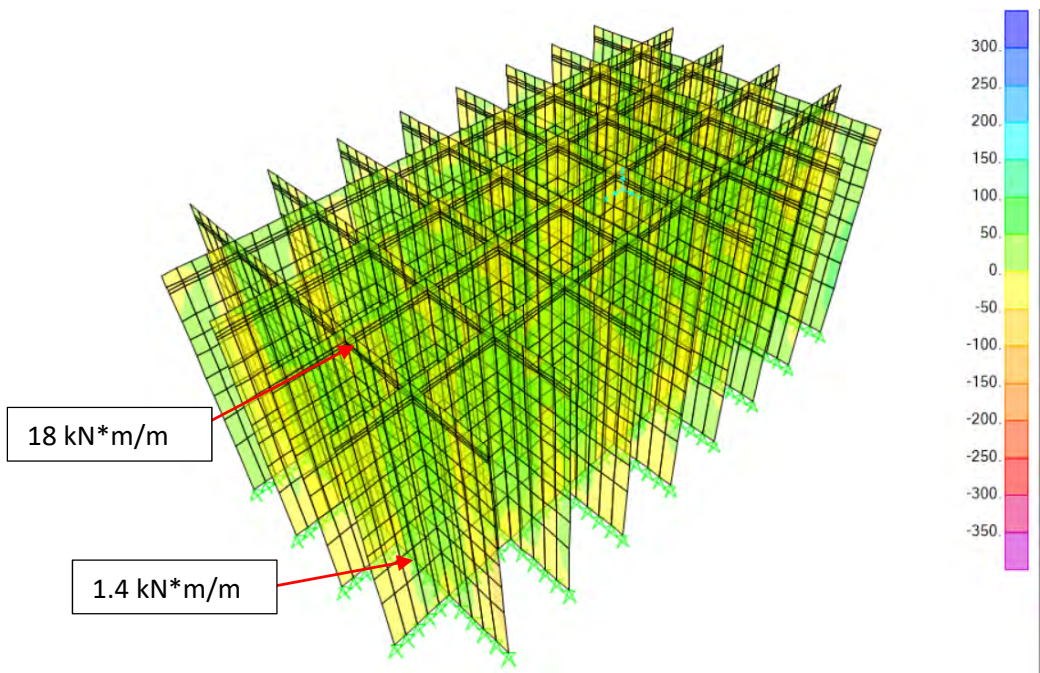


Figura 158 – M11 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento torsor M12:

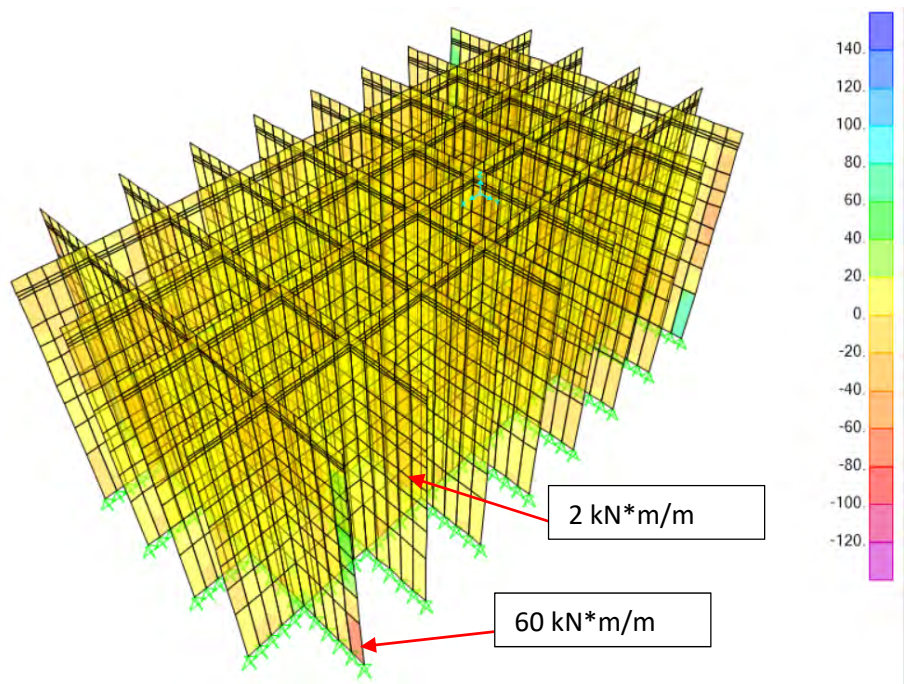


Figura 159 – M12 ELS Seno de la ola

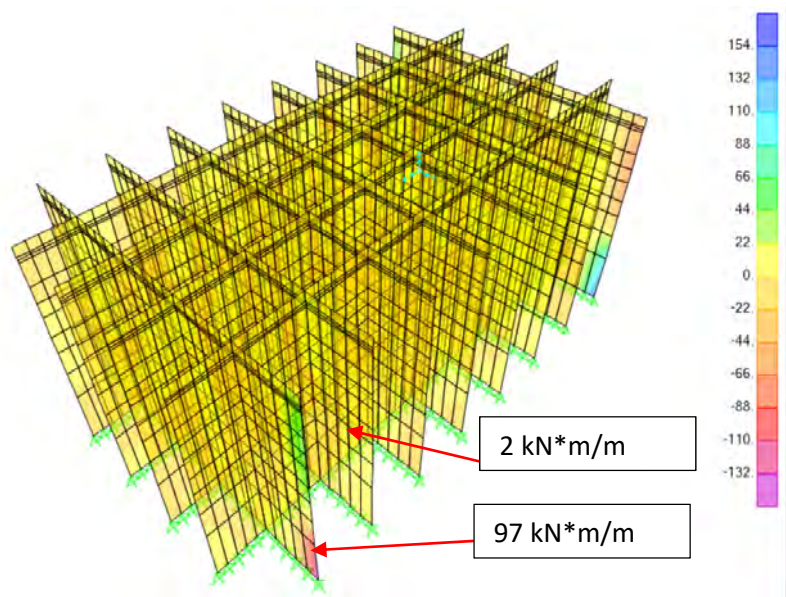


Figura 160 – M12 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje horizontal:

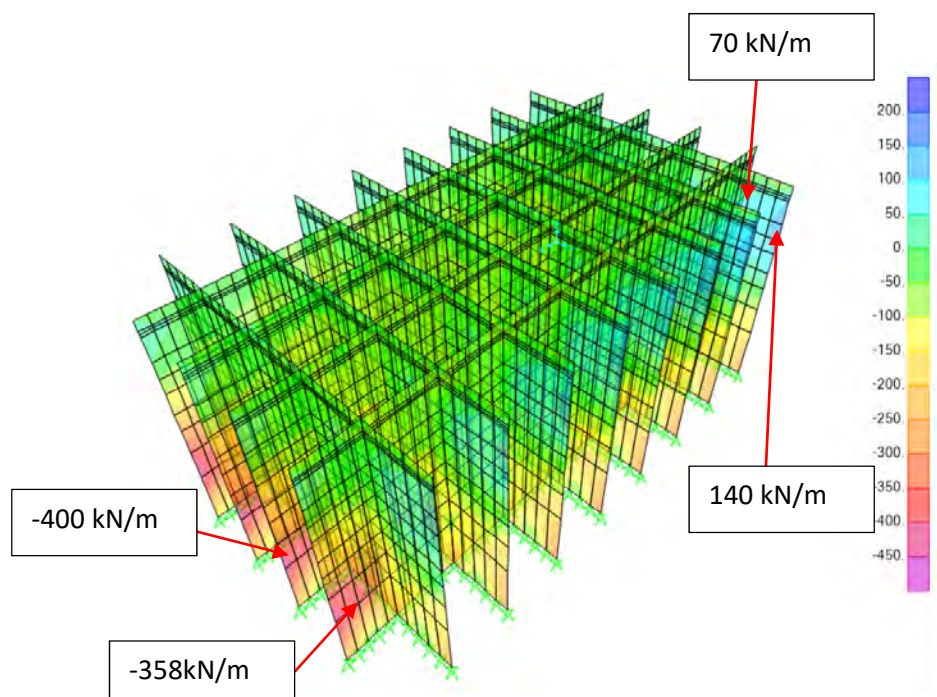


Figura 161 – F11 ELS Seno de la ola

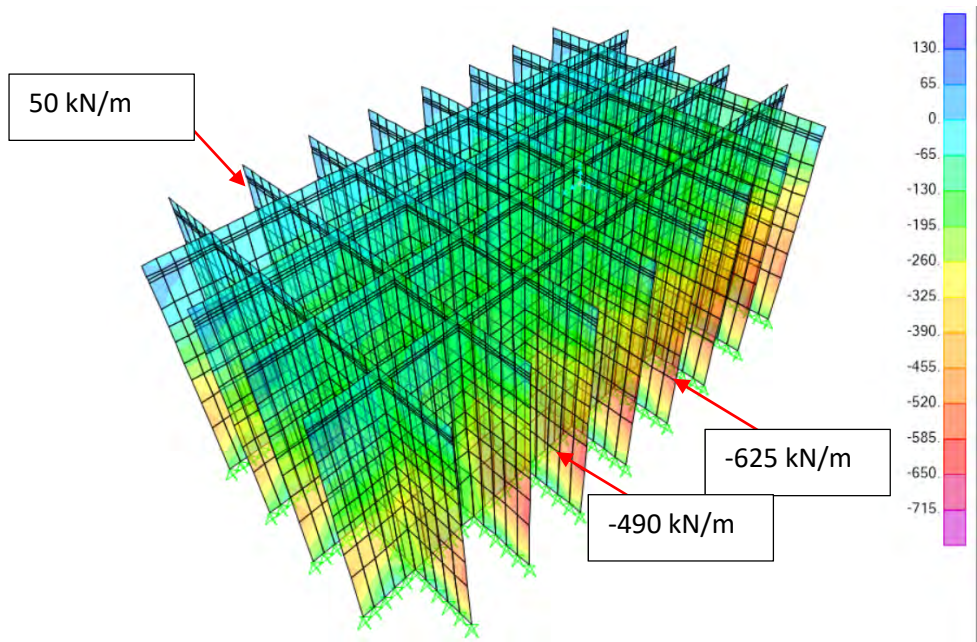
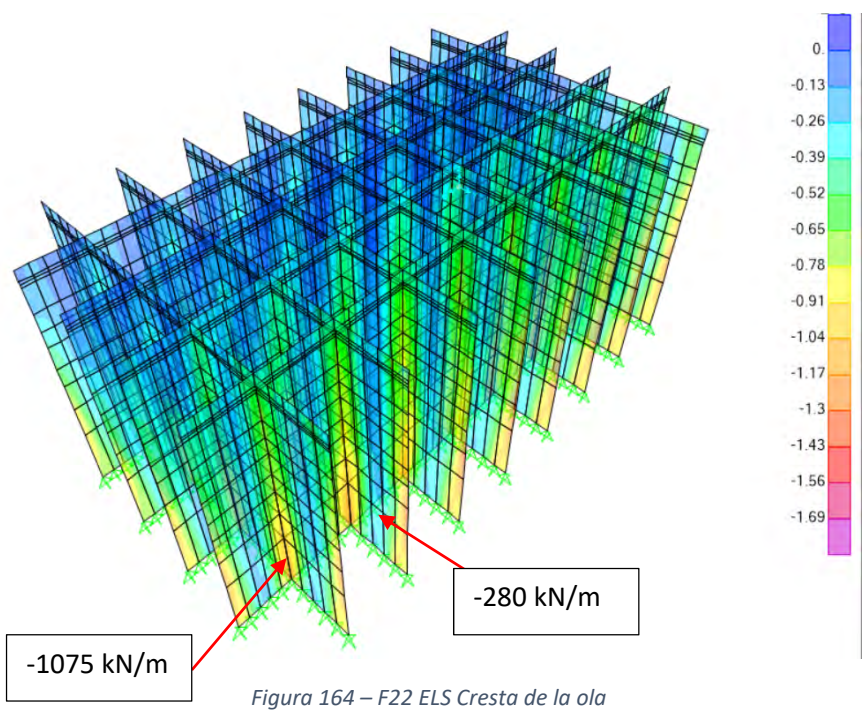
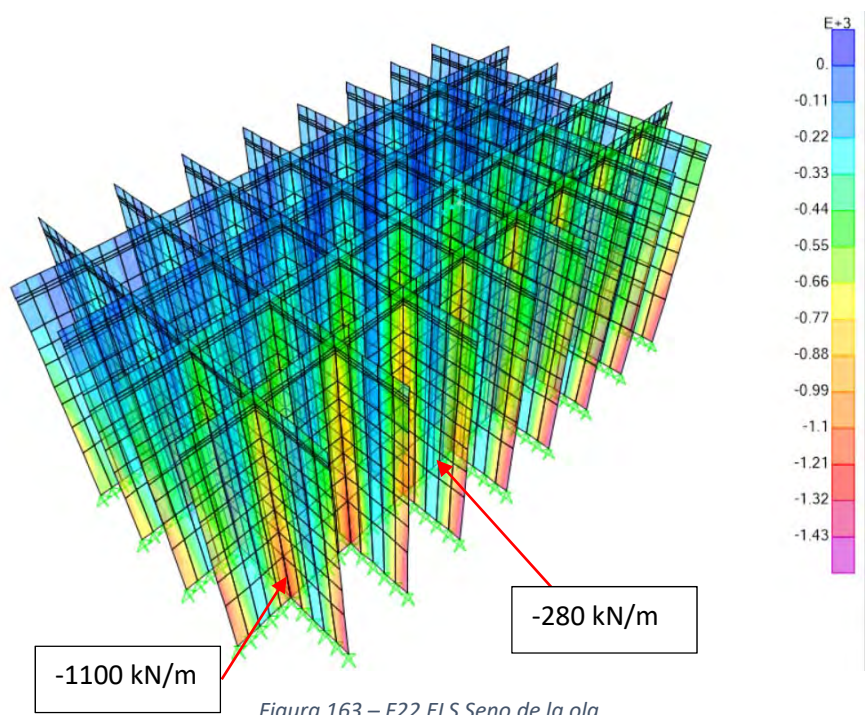


Figura 162 – F11 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje vertical:



Los resultados para las paredes interiores del cortante V13:

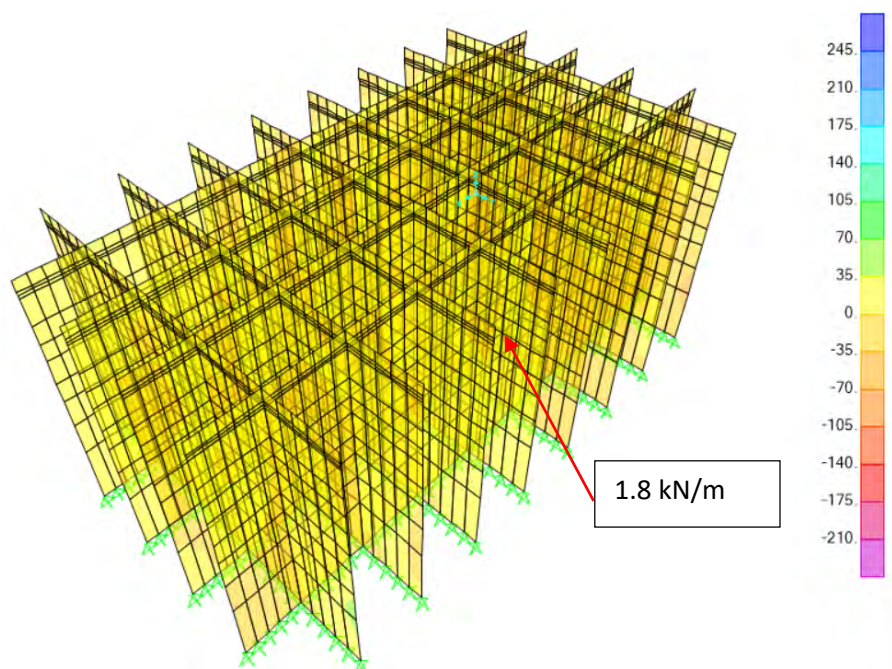


Figura 165 – V13 ELS Seno de la ola

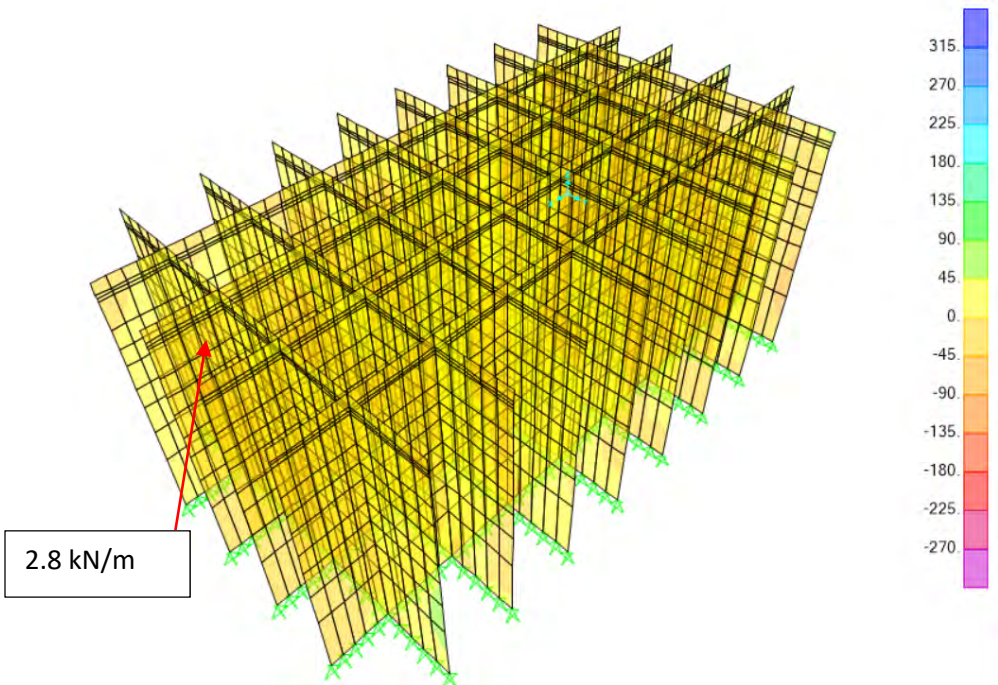


Figura 166 – V13 ELS Cresta de la ola



Los resultados para las paredes interiores del cortante V23:

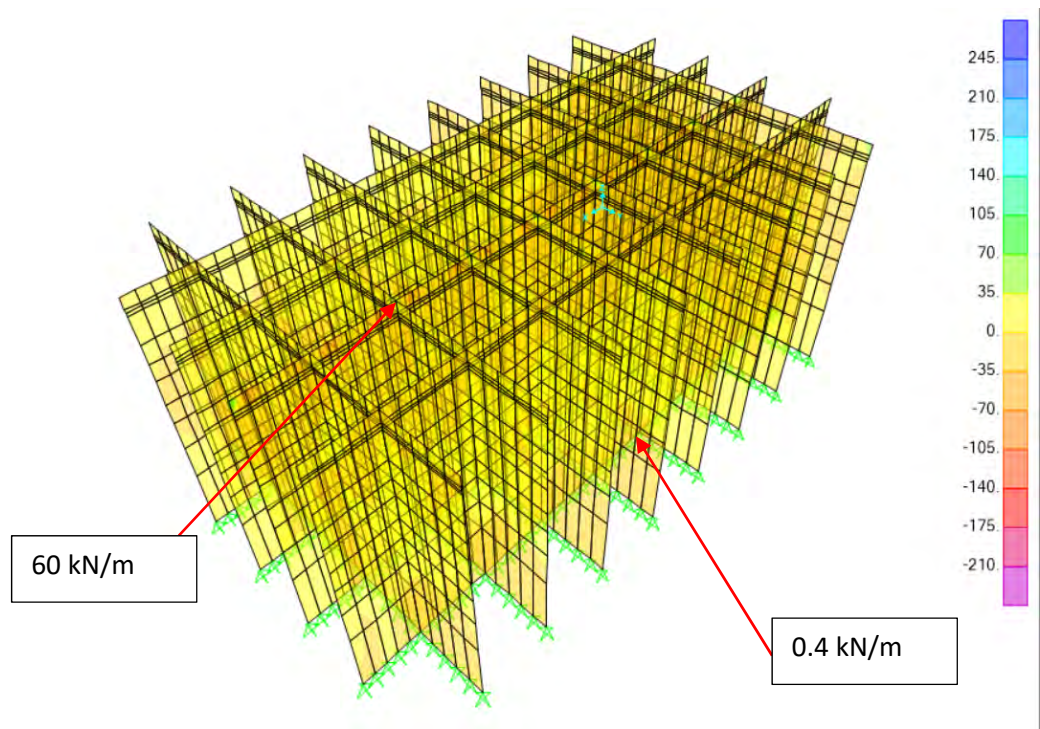


Figura 167 – V23 ELS Seno de la ola

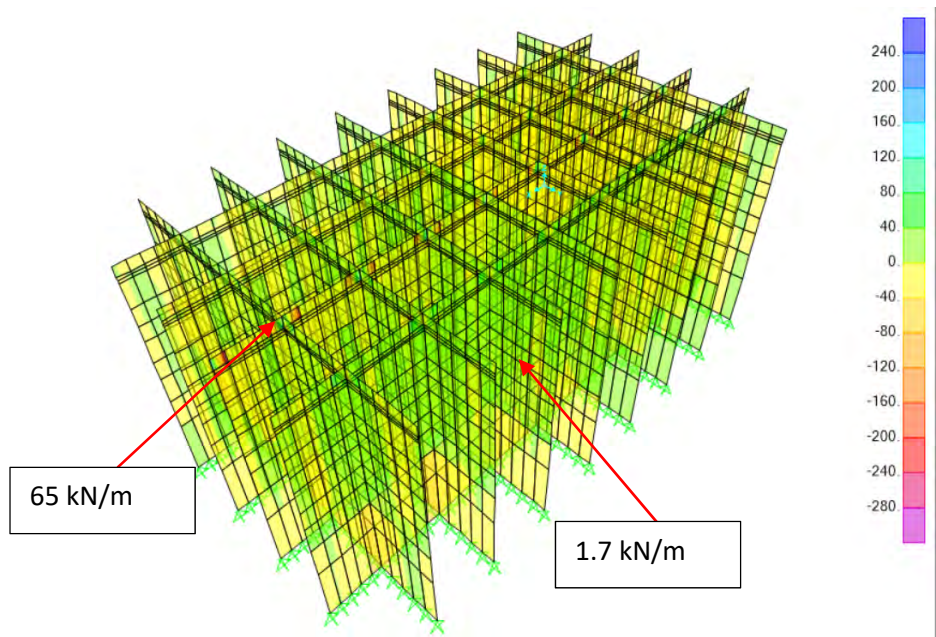


Figura 168 – V23 ELS Cresta de la ola



### 2.2.3. Resumen ELS celdas circulares

Paredes exteriores														
	M22 (kN*m/m)		M11 (kN*m/m)		M12 (kN*m/m)		F11 (kN/m)		F22 (kN/m)		V13 (kN/m)		V23 (kN/m)	
	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2
ELS Cresta de la ola	120	22	290	35	25	1.9	23/-250	10/-206	-580	-185	225	225	3	3
ELS Seno de la ola	90	5	250	25	70	3	50/-150	50/-160	-260	-85	154	154	3	3

Paredes interiores														
	M22 (kN*m/m)		M11 (kN*m/m)		M12 (kN*m/m)		F11 (kN/m)		F22 (kN/m)		V13 (kN/m)		V23 (kN/m)	
	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2
ELS Cresta de la ola	100	0.4	18	1.4	97	2	50/-625	0/-490	-1075	-280	2.8	2.8	65	1.7
ELS Seno de la ola	80	0.5	3	3	60	2	140/-400	70/-358	-1100	-280	1.8	1.8	60	0.4

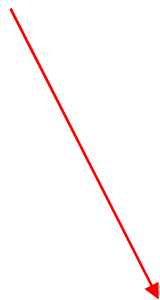
## 3. Resultados modelo celdas circulares optimizadas

A continuación se muestran los resultados obtenidos en Estado Límite Último tanto para las paredes interiores como exteriores. Los resultados ya se encuentran mayorados.

### 3.1. ELU

#### 3.1.1. Paredes exteriores

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje horizontal



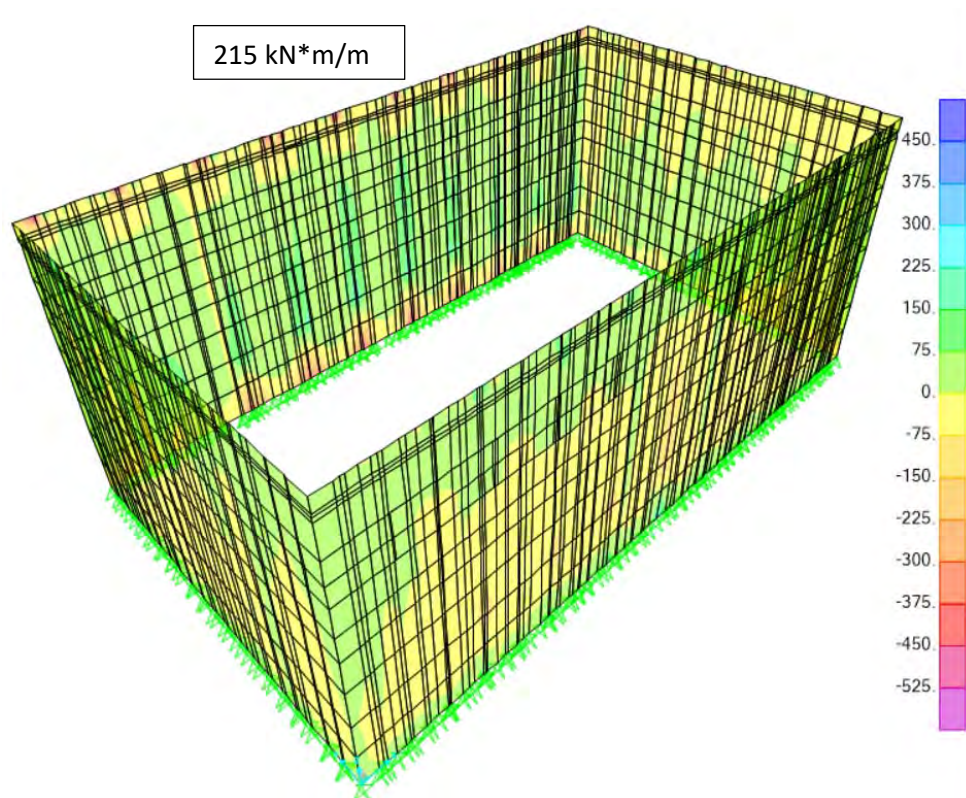


Figura 169 – M22 ELU Cresta de la ola

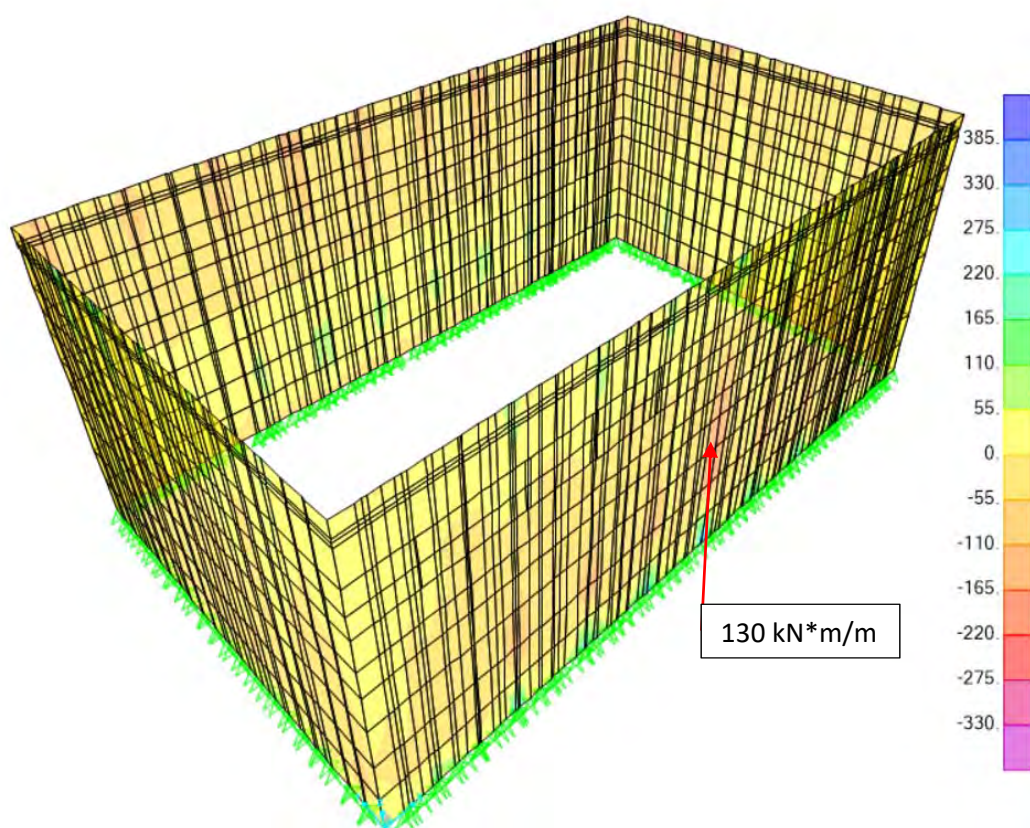


Figura 170 – M22 ELU Seno de la ola



Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje vertical:

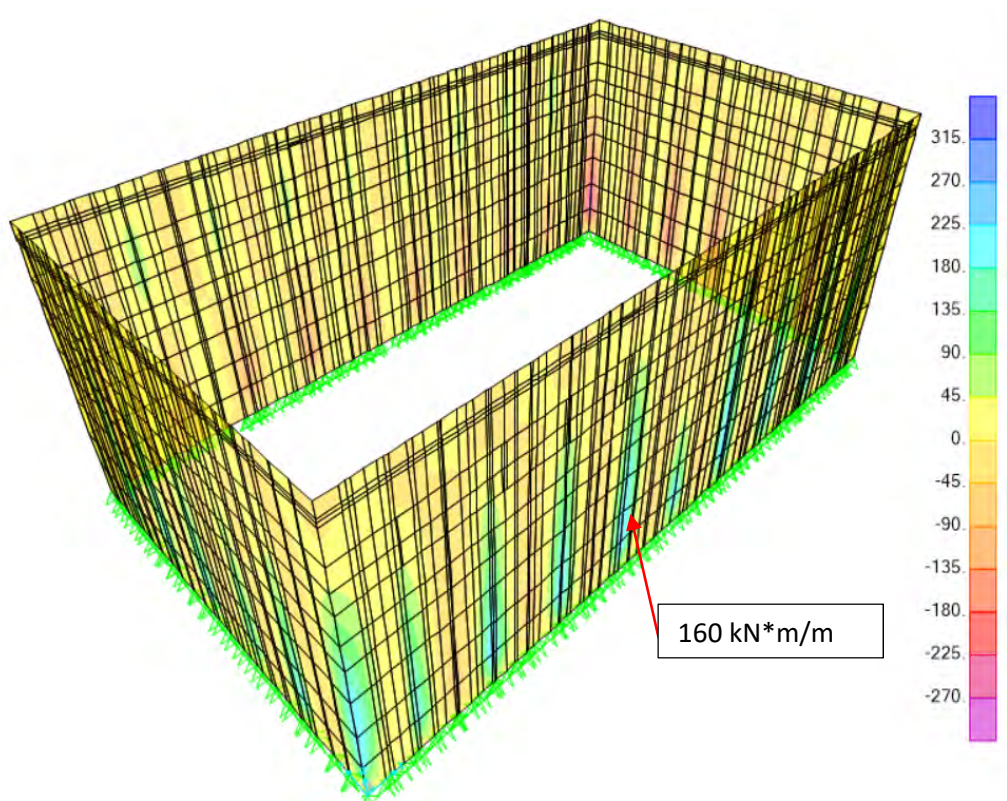


Figura 171 – M11 ELU Seno de la ola

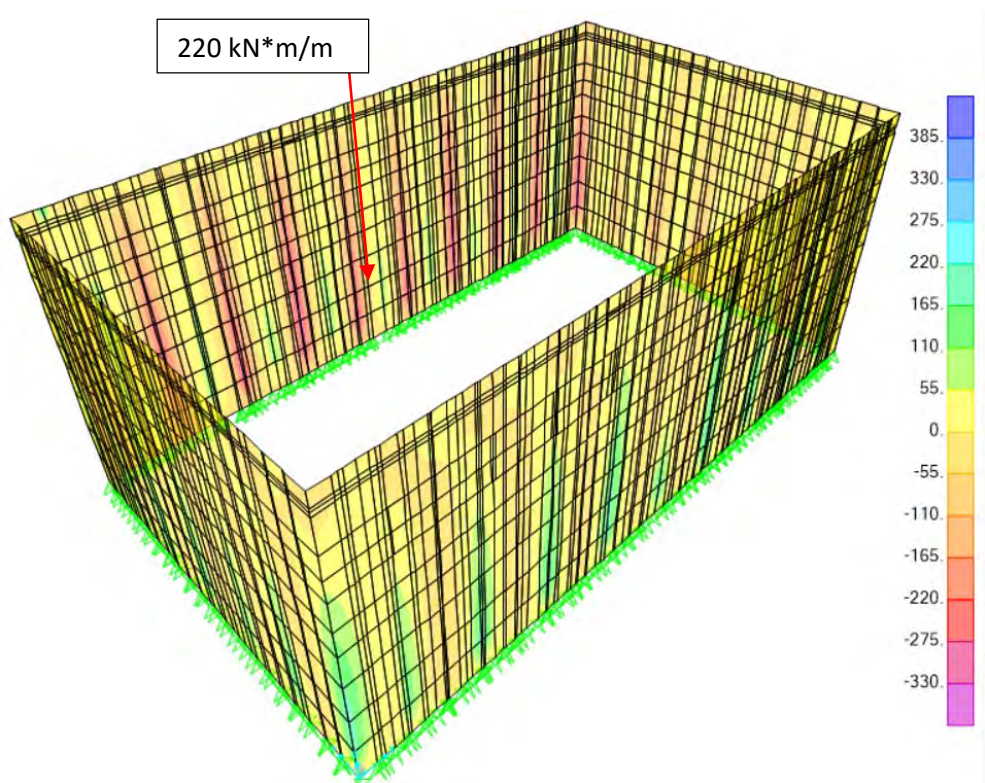


Figura 172 – M11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento torsor M12:

60 kN\*m/m



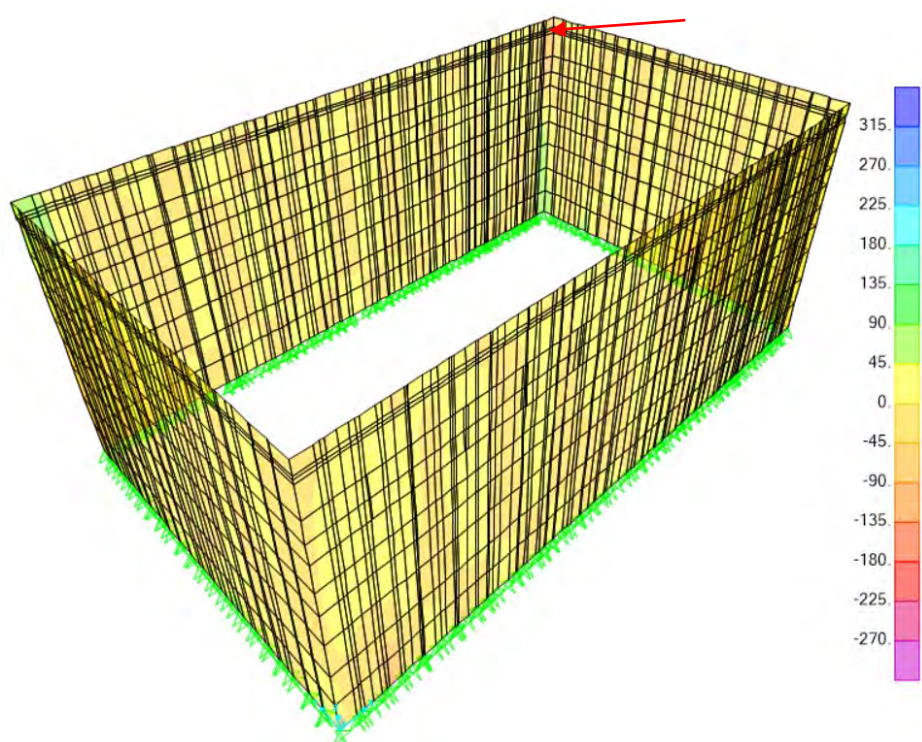


Figura 173 – M12 ELU Seno de la ola

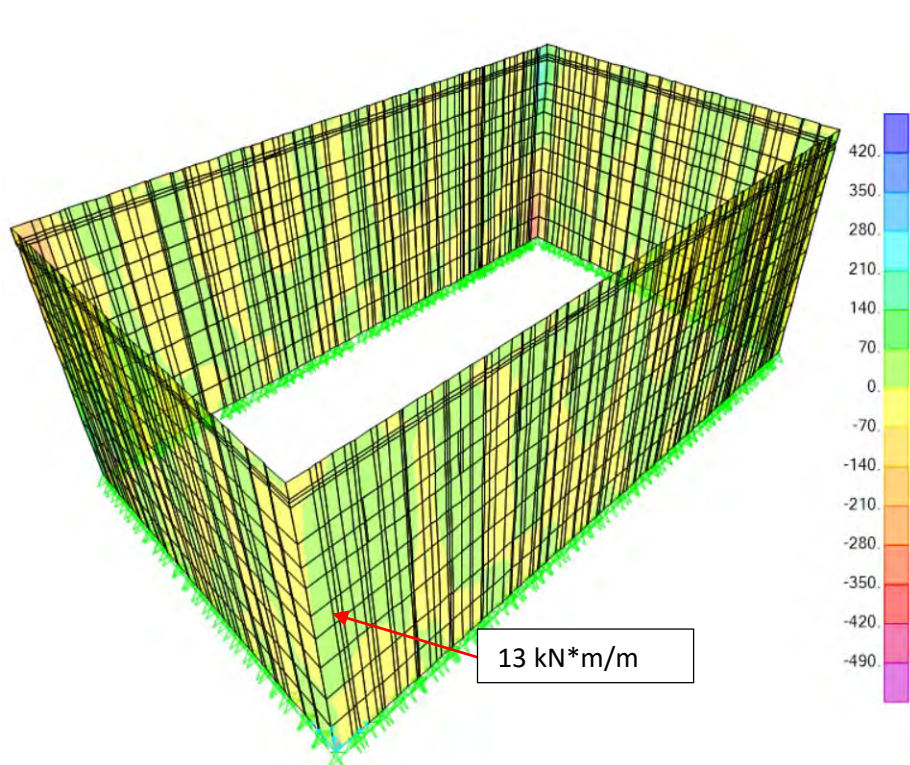


Figura 174 – M12 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje horizontal:

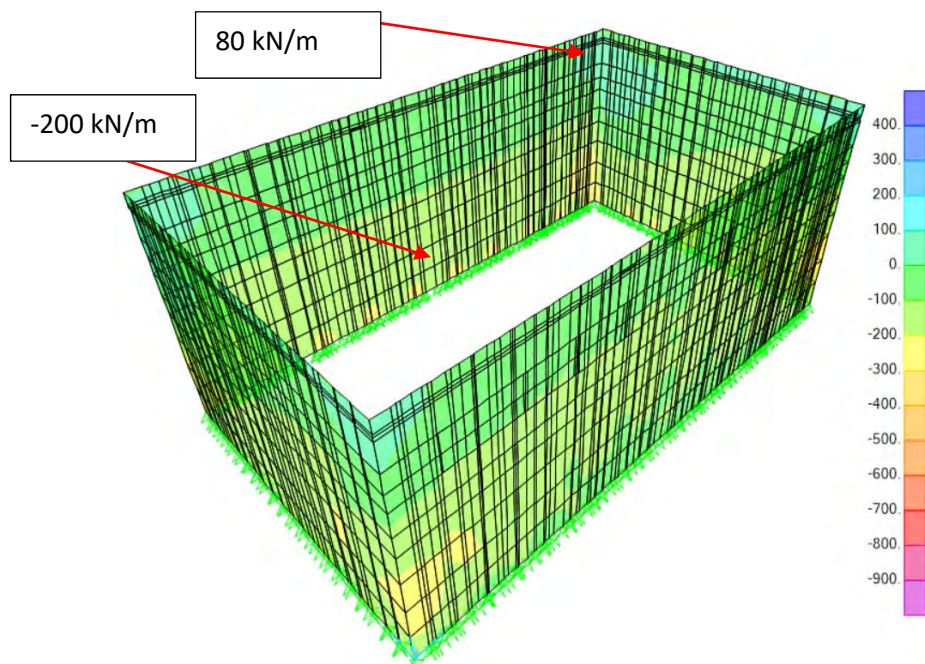


Figura 175 – F11 ELU Seno de la ola

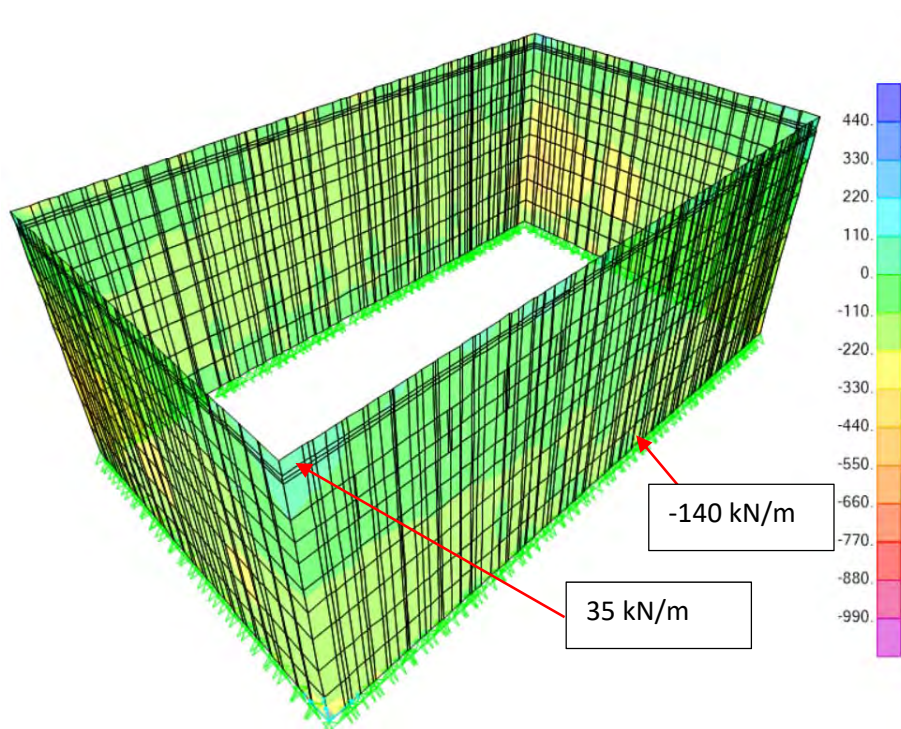


Figura 176 – F11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje vertical:



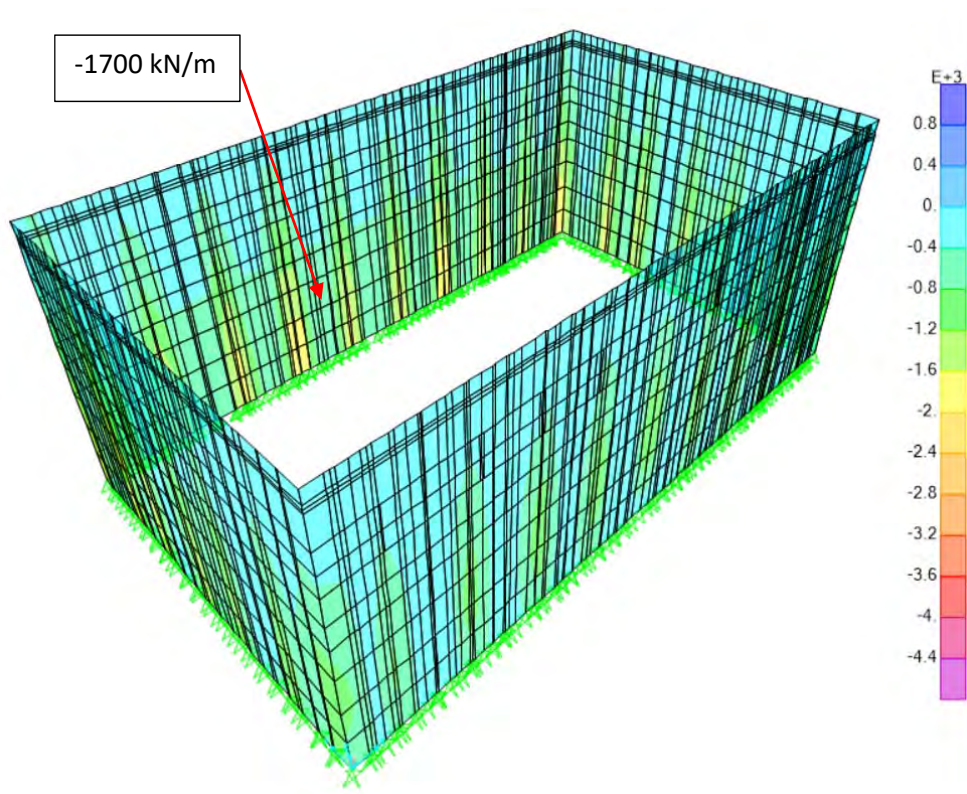


Figura 177 – F22 ELU Seno de la ola

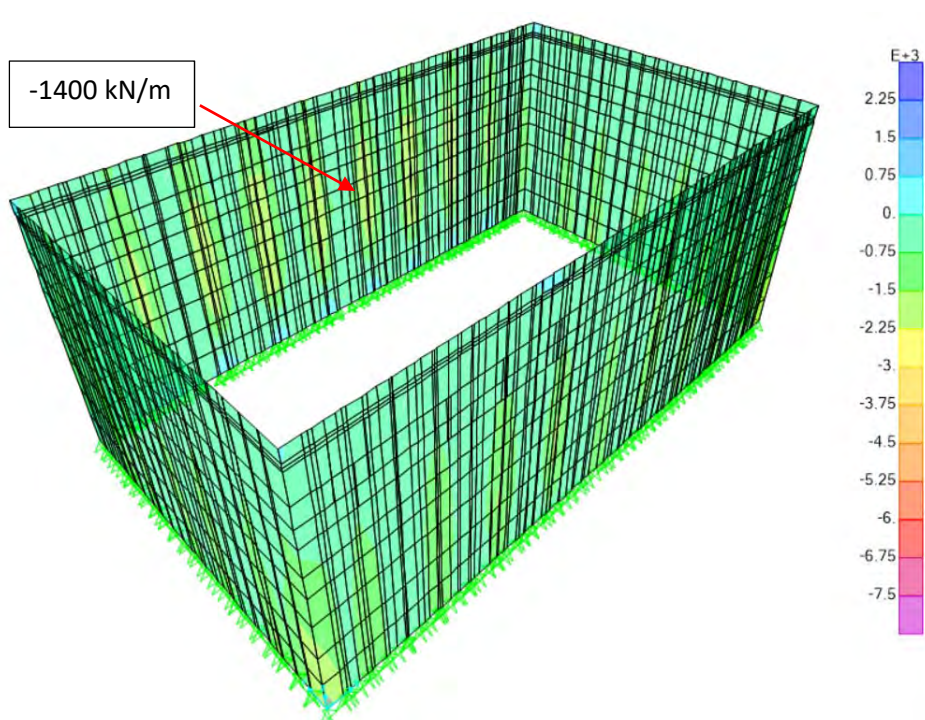


Figura 178 – F22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V13:



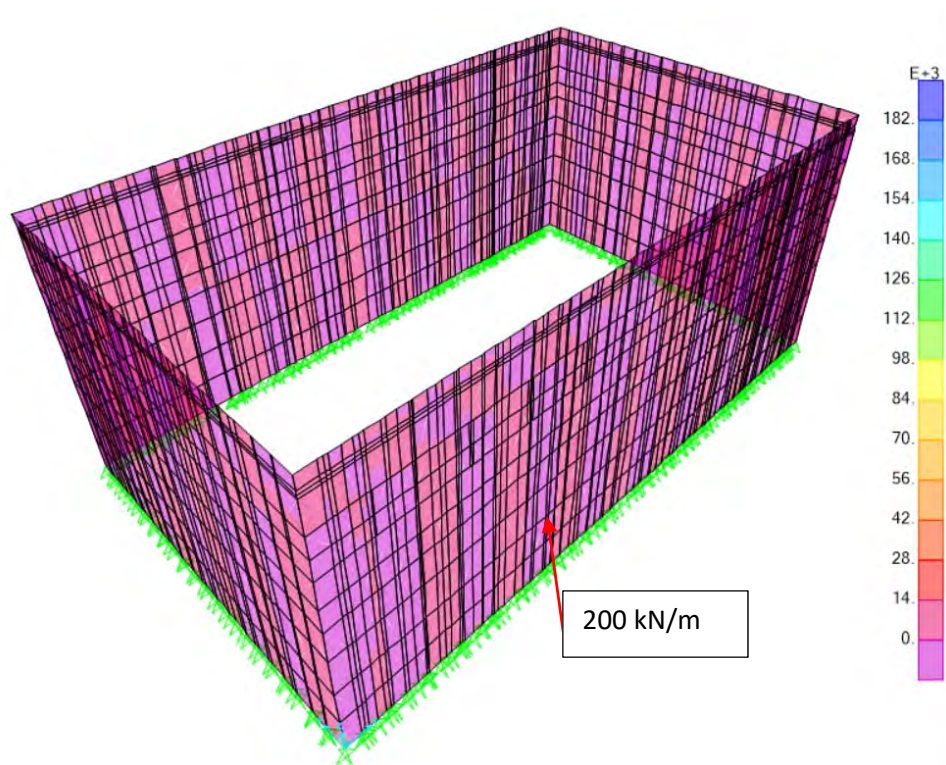


Figura 179 – V13 ELU Seno de la ola

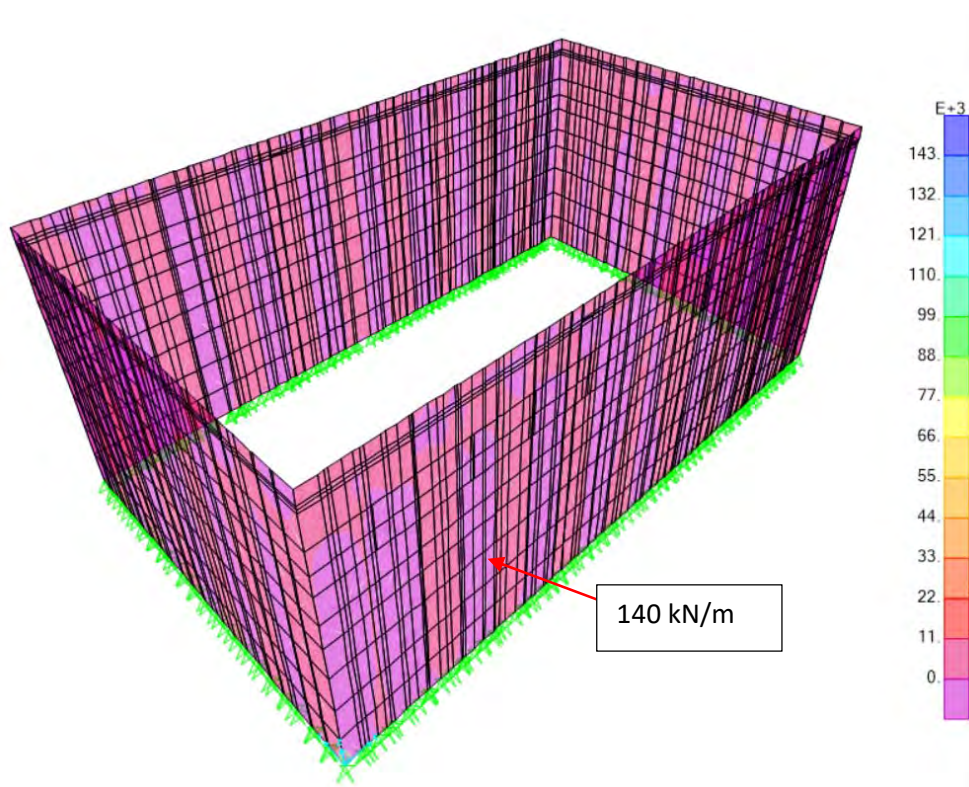


Figura 180 – V13 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del cortante V23:

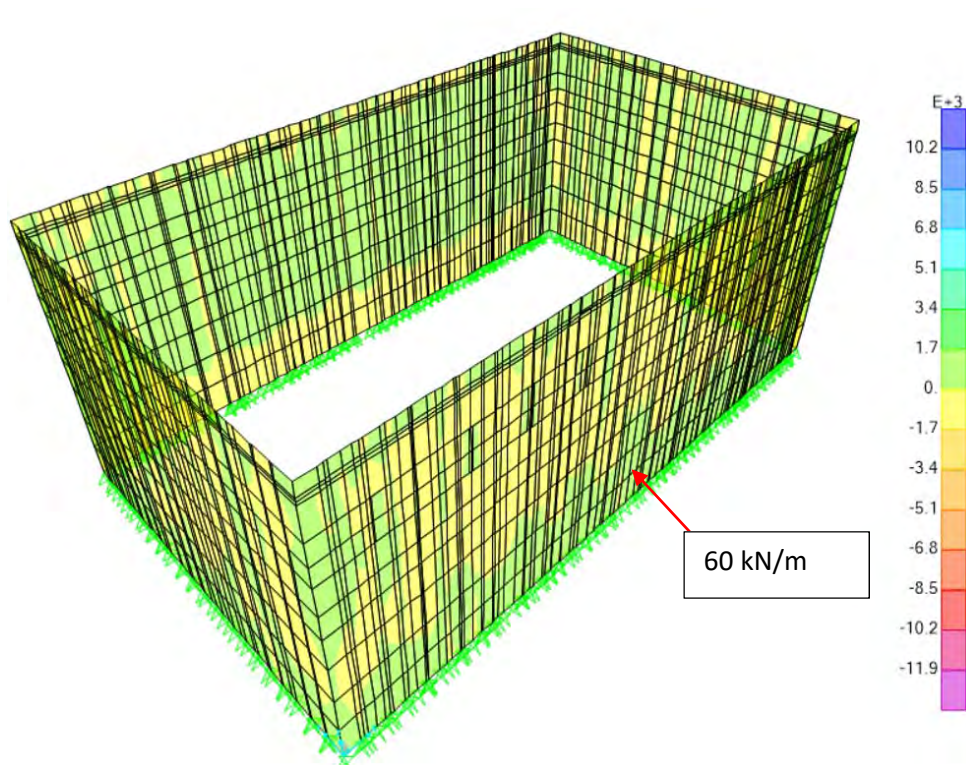


Figura 181 – V23 ELU Seno de la ola

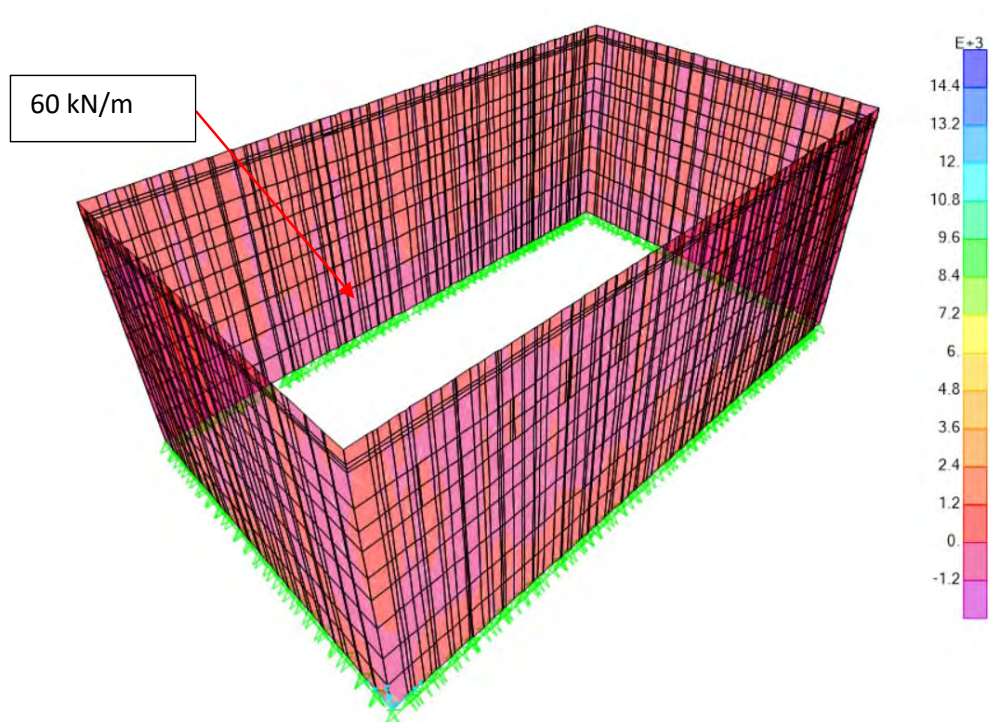


Figura 182 – V23 ELU Cresta de la ola

### 3.1.2. Paredes interiores

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje horizontal:



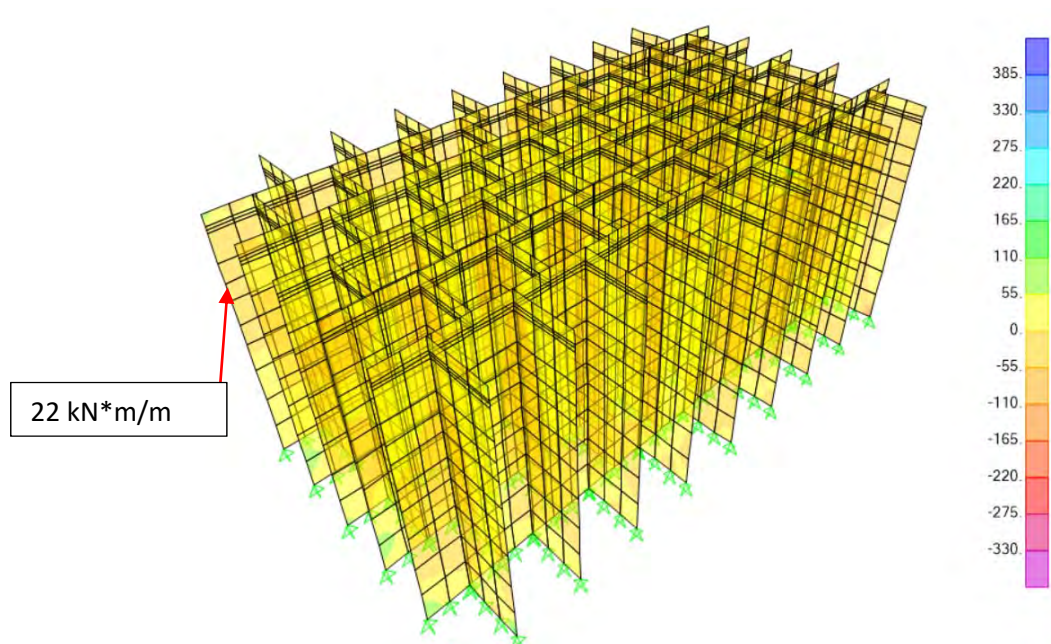


Figura 183 – M22 ELU Seno de la ola

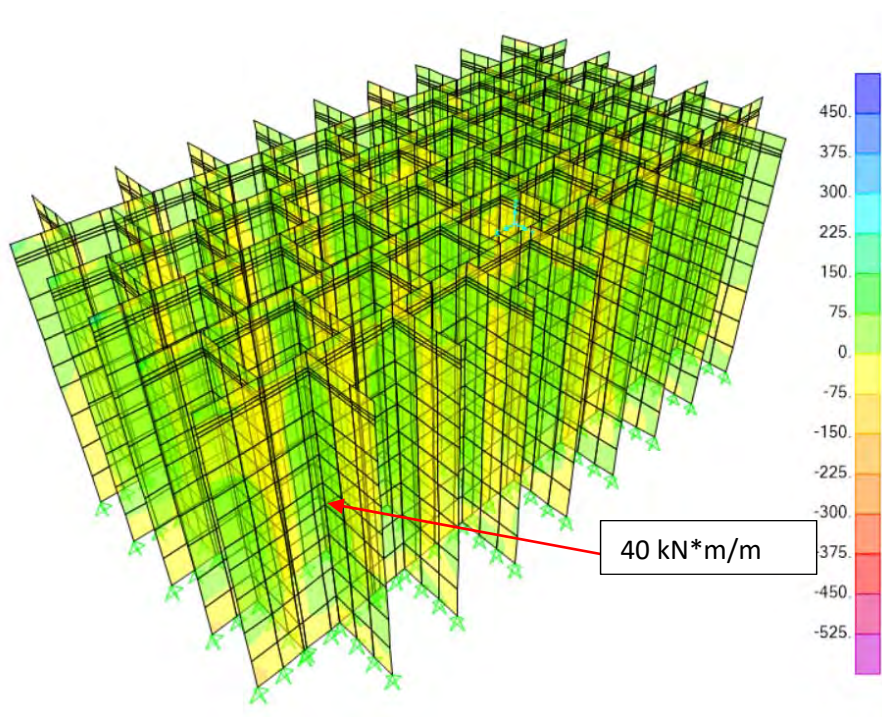


Figura 184 – M22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje vertical:



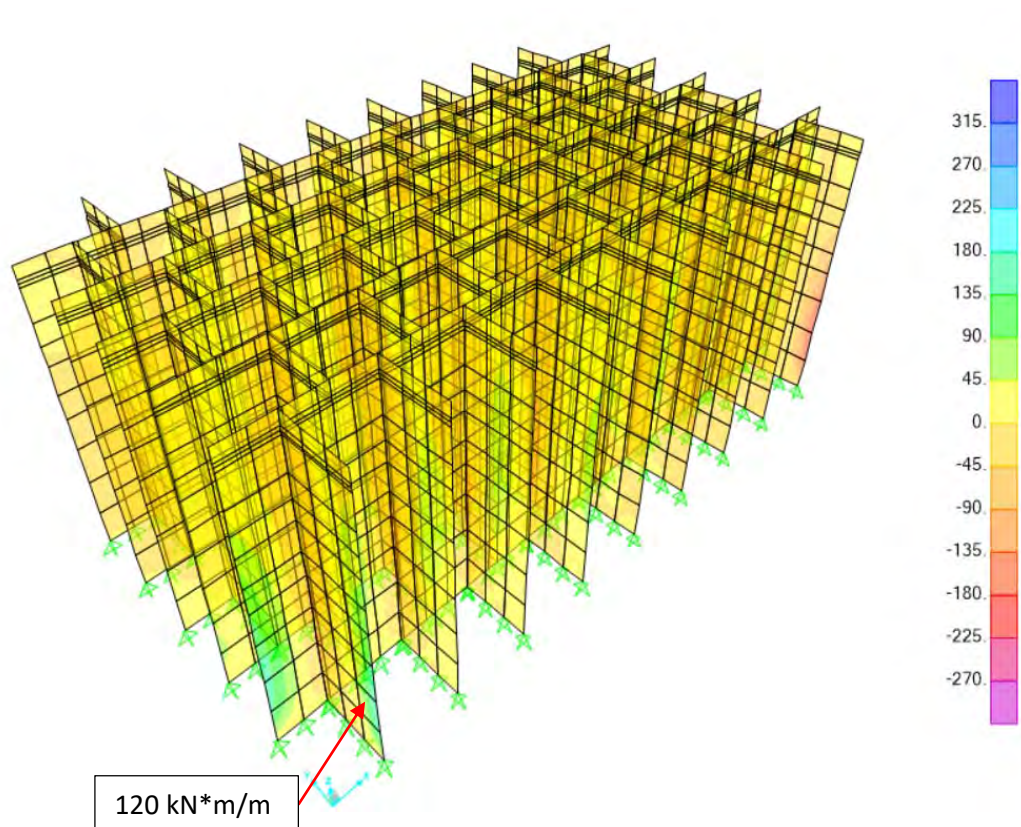


Figura 185 – M11 ELU Seno de la ola

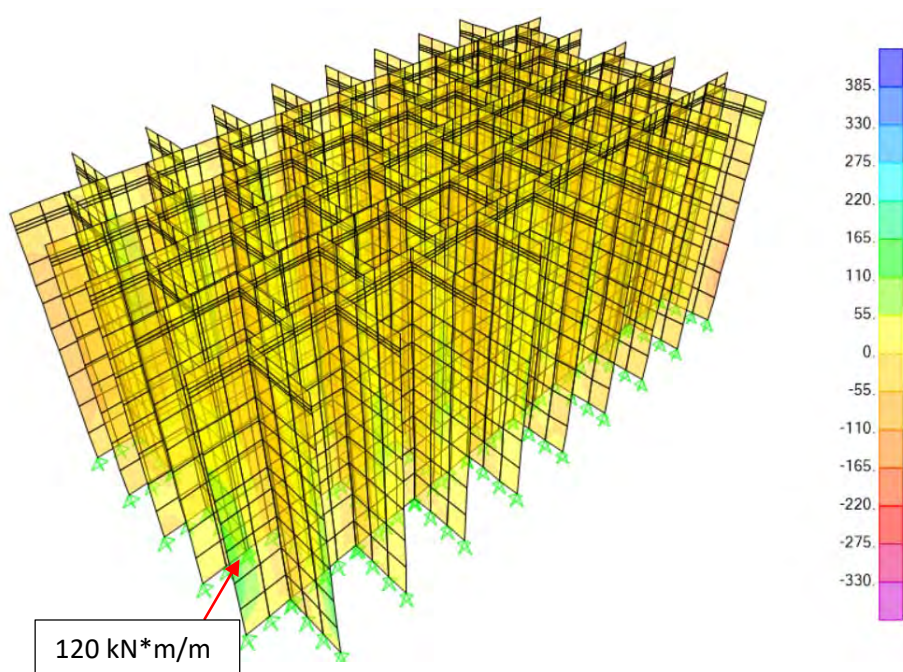


Figura 186 – M11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento torsor M12:

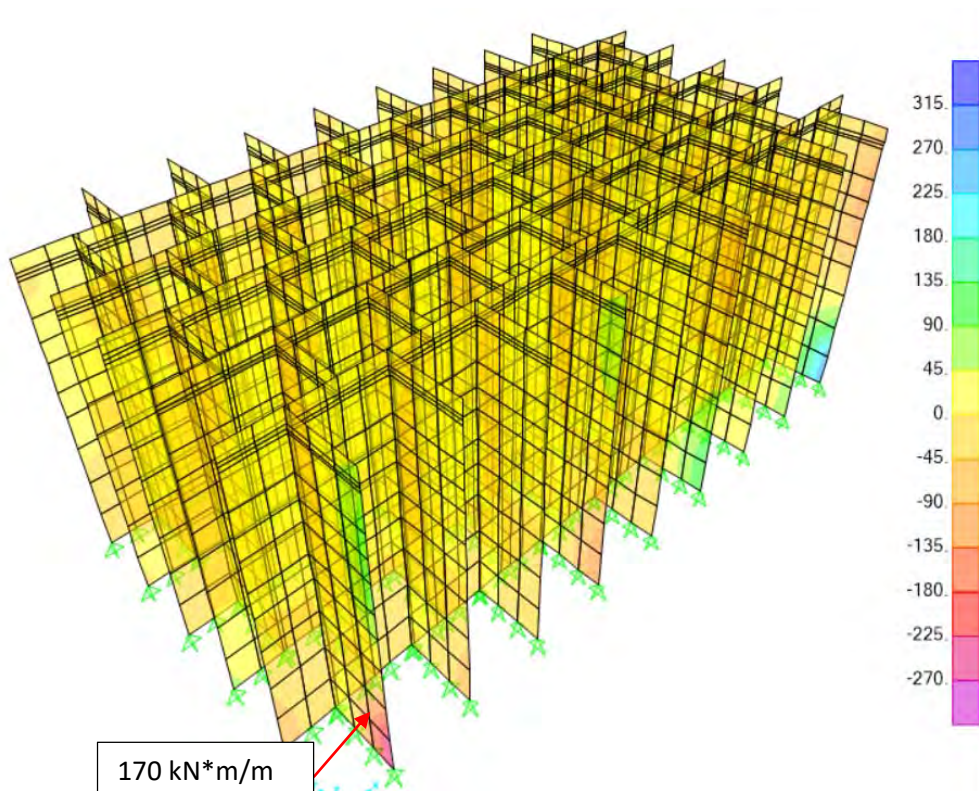


Figura 187 – M12 ELU Seno de la ola

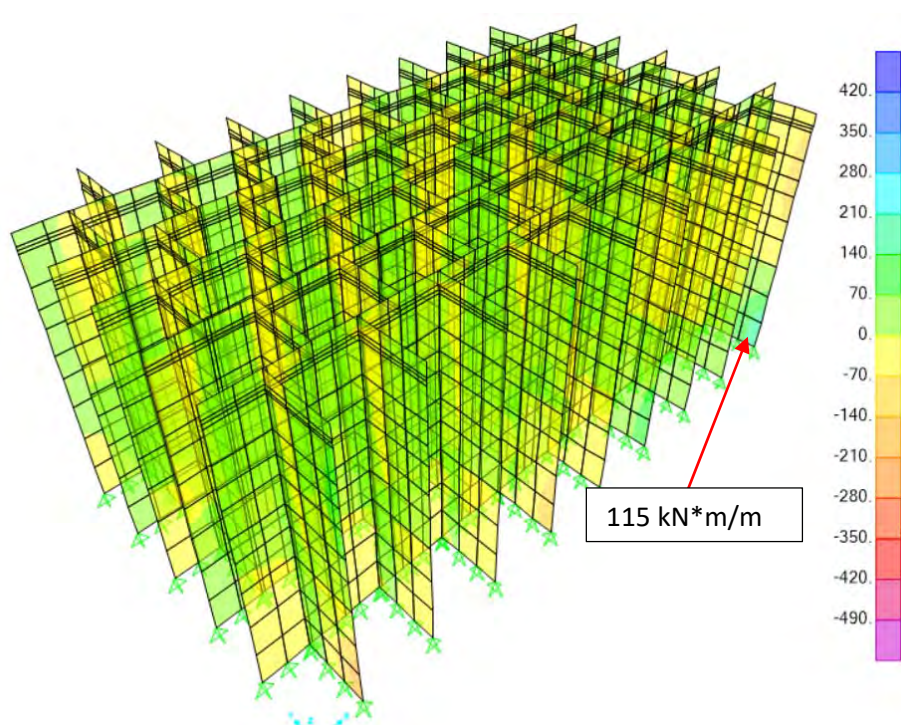


Figura 188 – M12 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje horizontal:



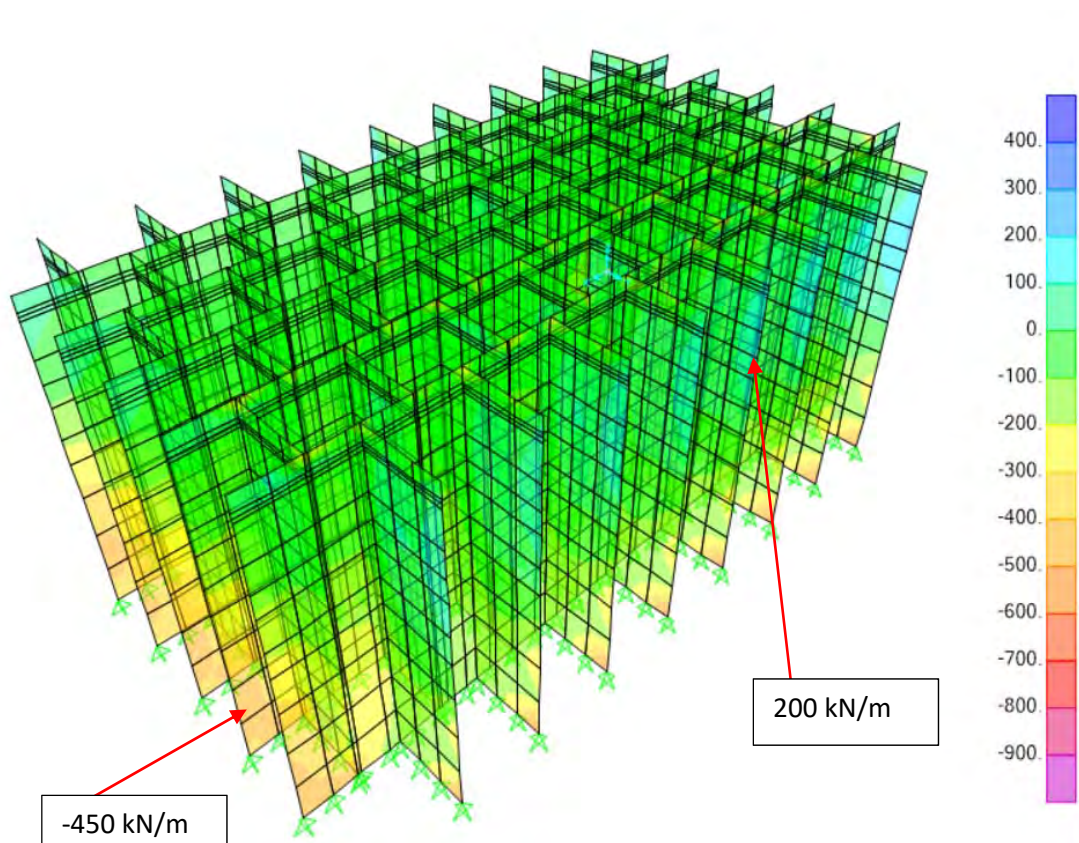


Figura 189 – F11 ELU Seno de la ola

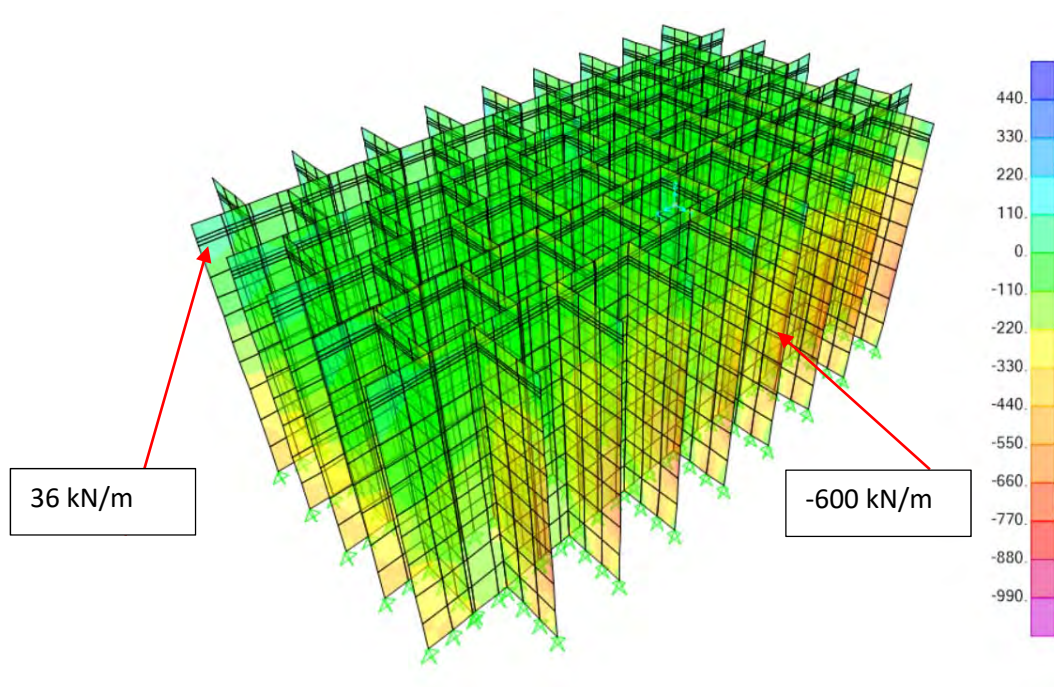


Figura 190 – F11 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje vertical:



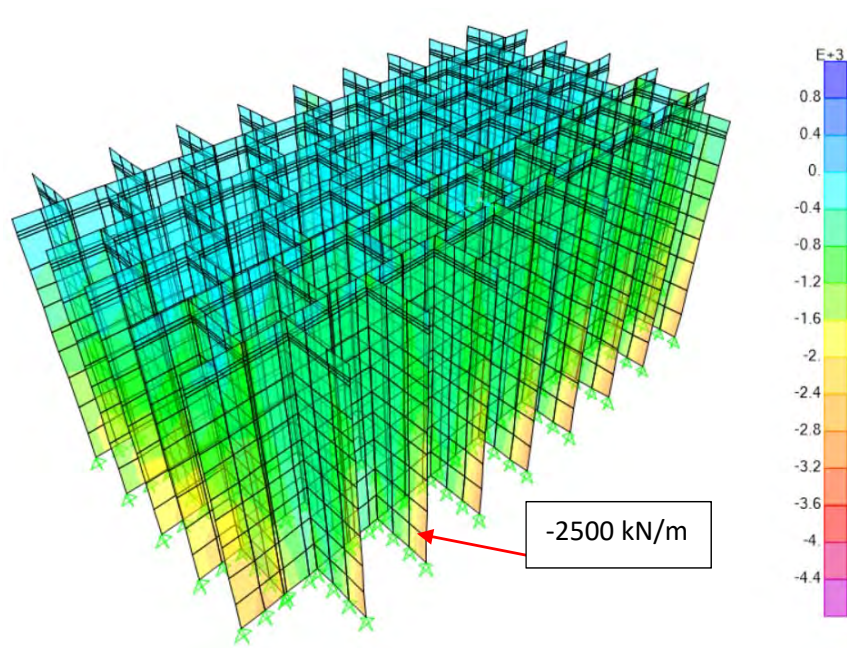


Figura 191 – F22 ELU Seno de la ola

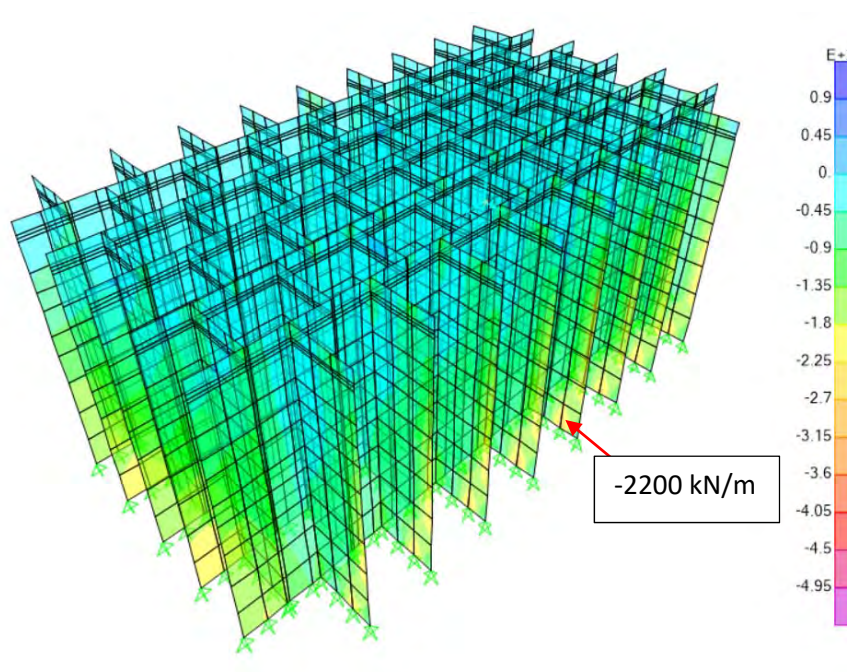


Figura 192 – F22 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del cortante V13:

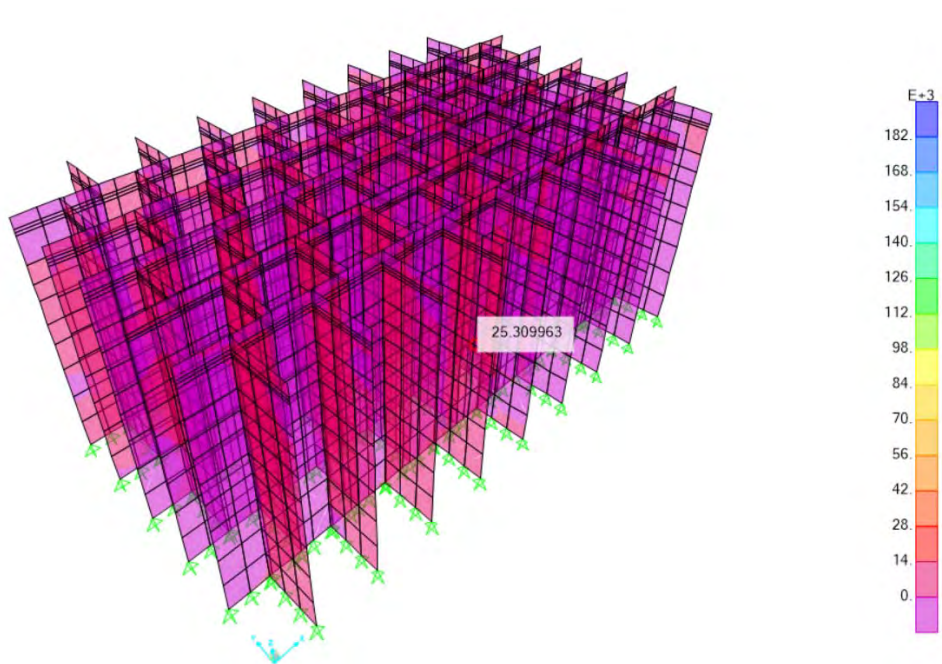


Figura 193 – V13 ELU Seno de la ola

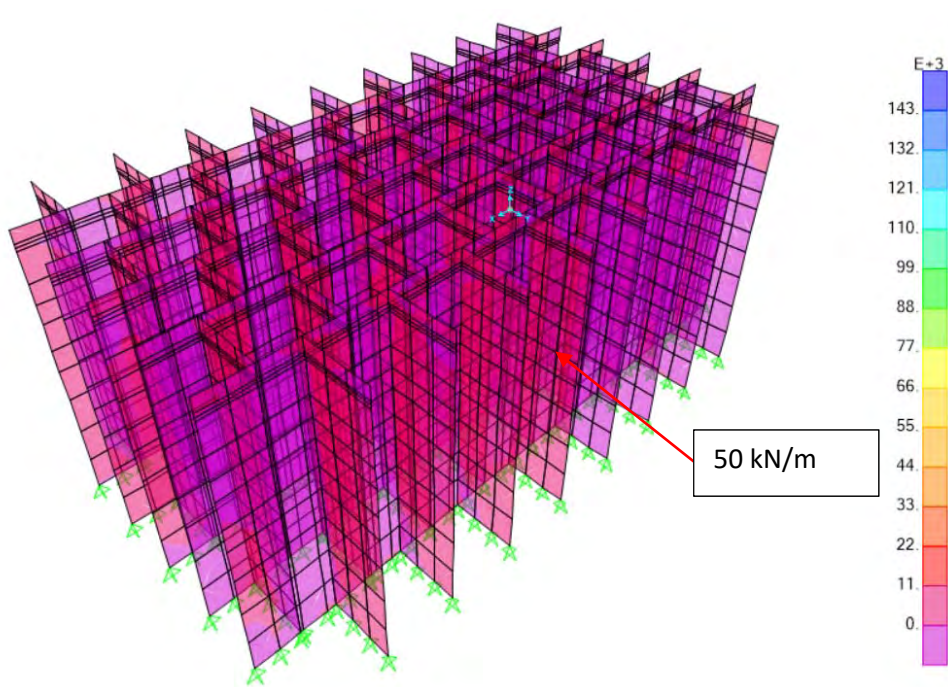


Figura 194 – V13 ELU Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del cortante V23:



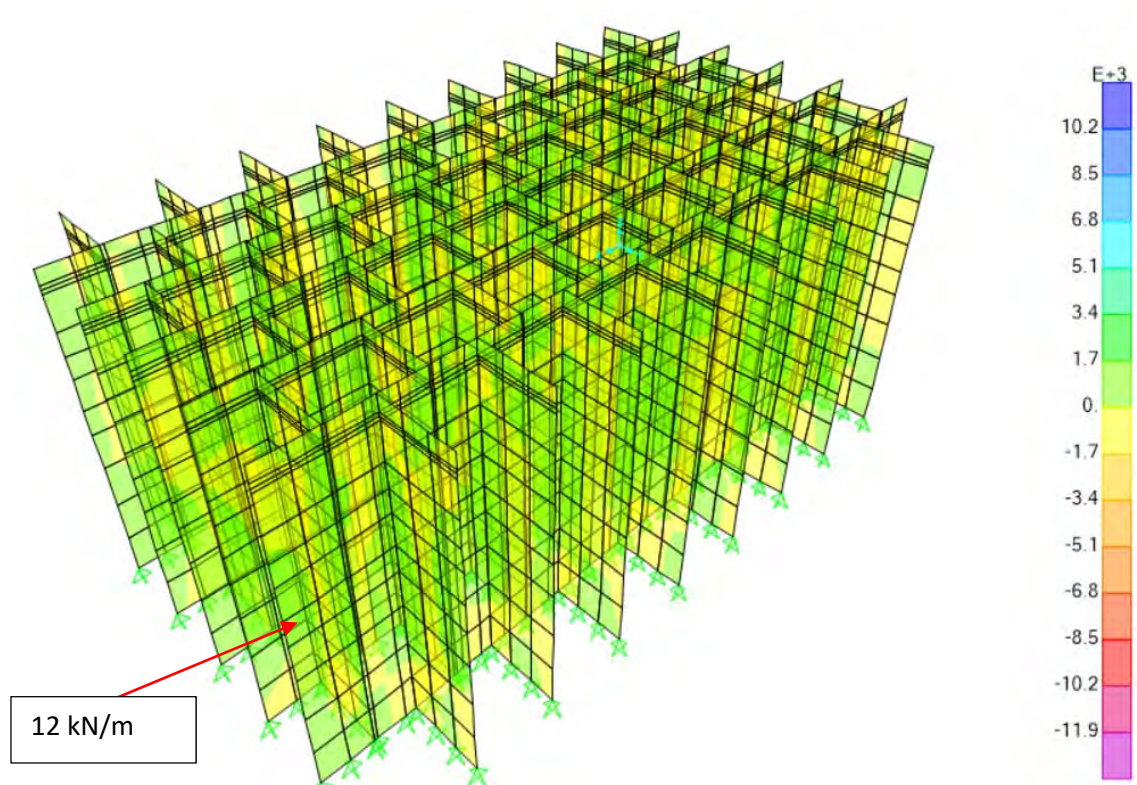


Figura 195 – V23 ELU Seno de la ola

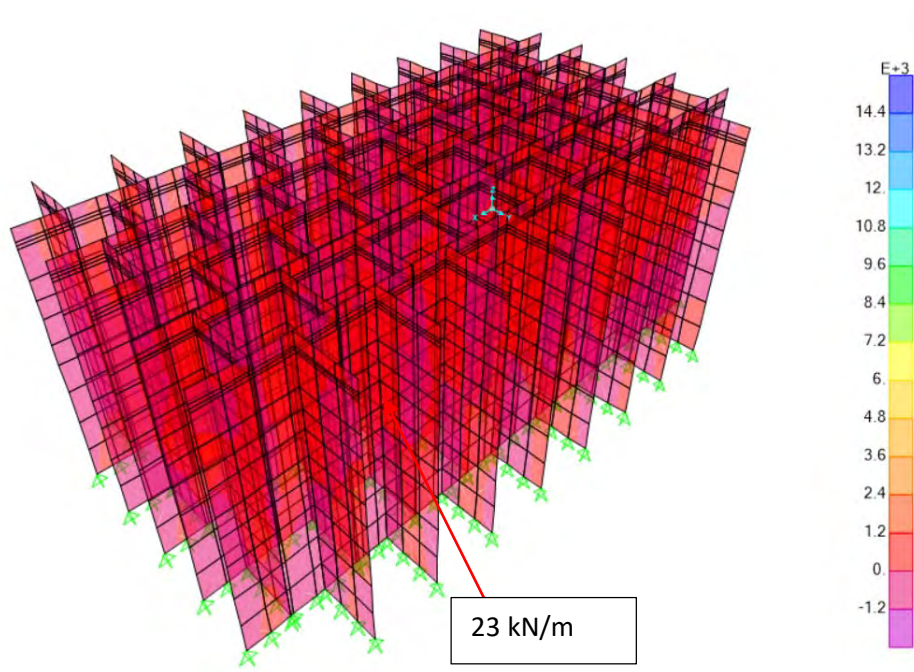


Figura 196 – V23 ELU Cresta de la ola



3.1.3. Resumen ELU celdas circulares optimizadas

Paredes interiores							
	M22 (kN*m/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	F11 (kN/m)	F22 (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)
ELU Cresta de la ola	40	120	115	36/-600	-2200	50	23
ELU Seno de la ola	22	120	170	200/-450	-2500	25	12

Paredes exteriores							
	M22 (kN*m/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	F11 (kN/m)	F22 (kN/m)	V13 (kN/m)	V23 (kN/m)
ELU Cresta de la ola	215	220	13	35/-140	-1400	140	60
ELU Seno de la ola	130	160	60	80/-200	-1700	200	60

3.2. ELS

3.2.1. Paredes exteriores

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje horizontal:

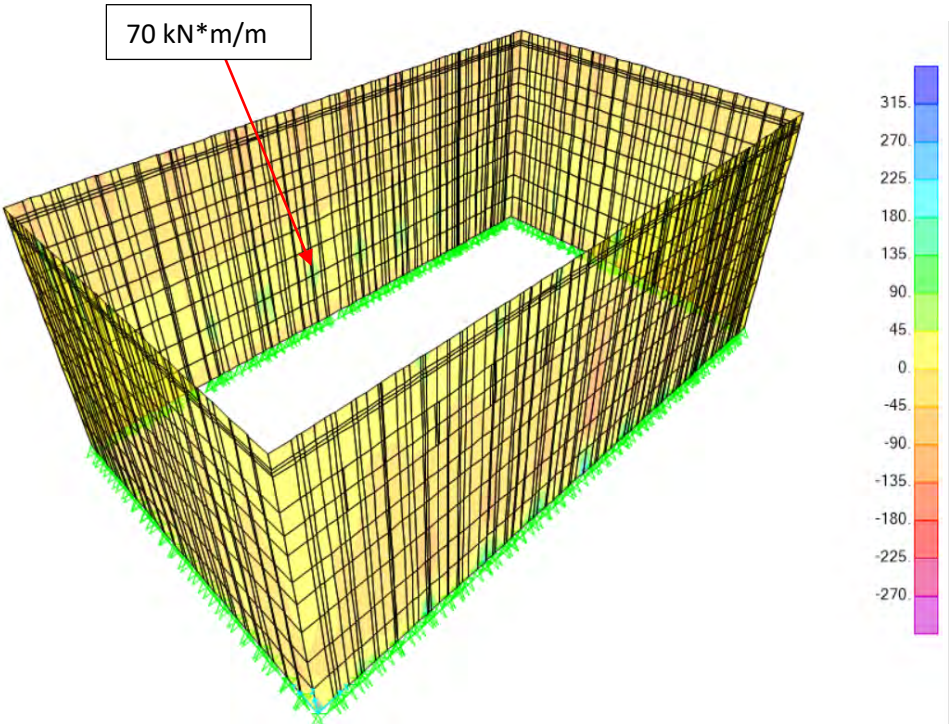


Figura 197 – M22 ELS Seno de la ola

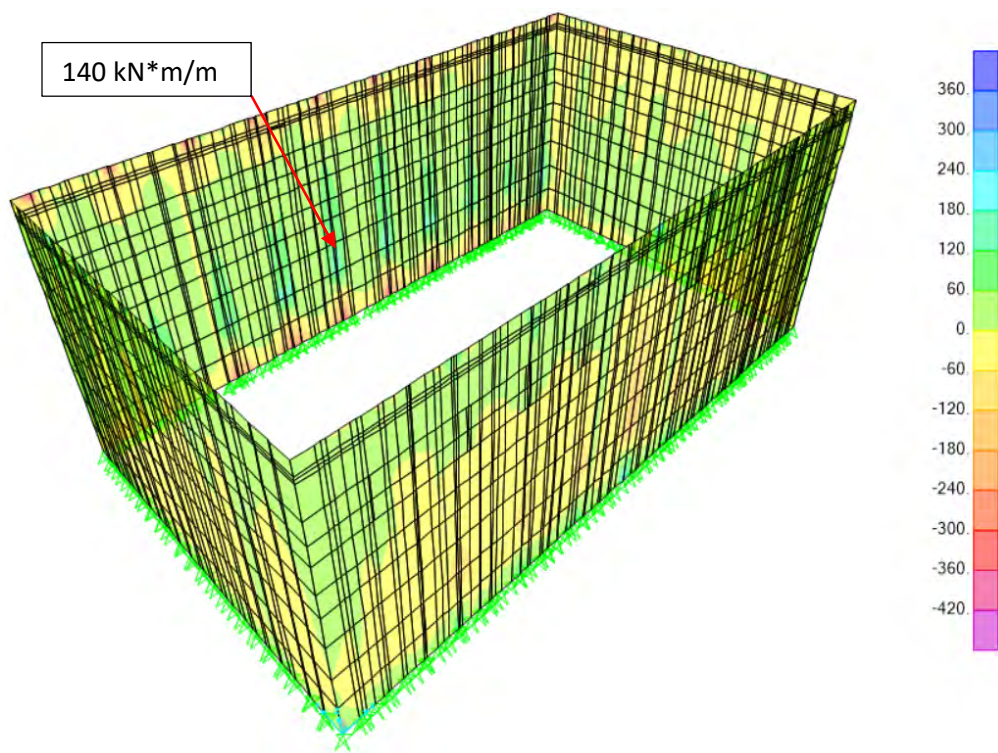


Figura 198 – M22 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento según el eje vertical:

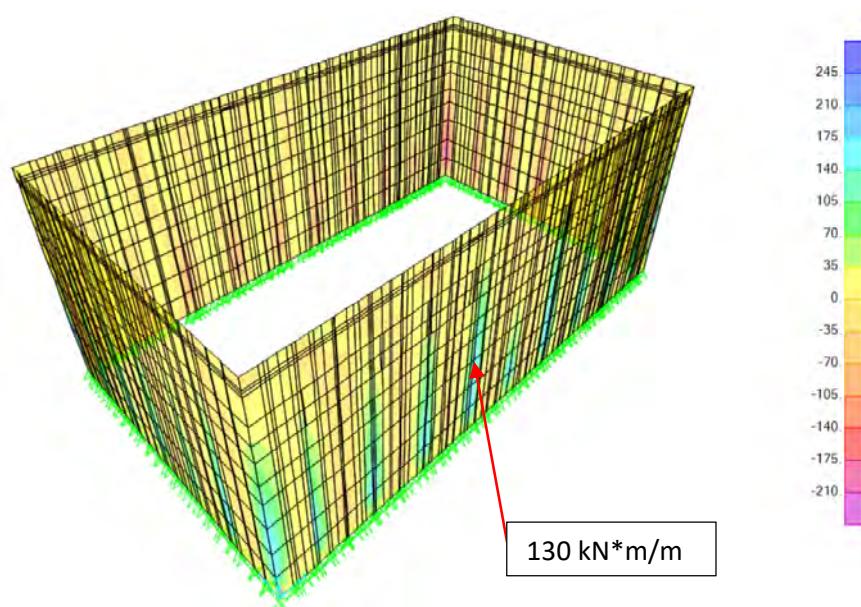


Figura 199 – M11 ELS Seno de la ola



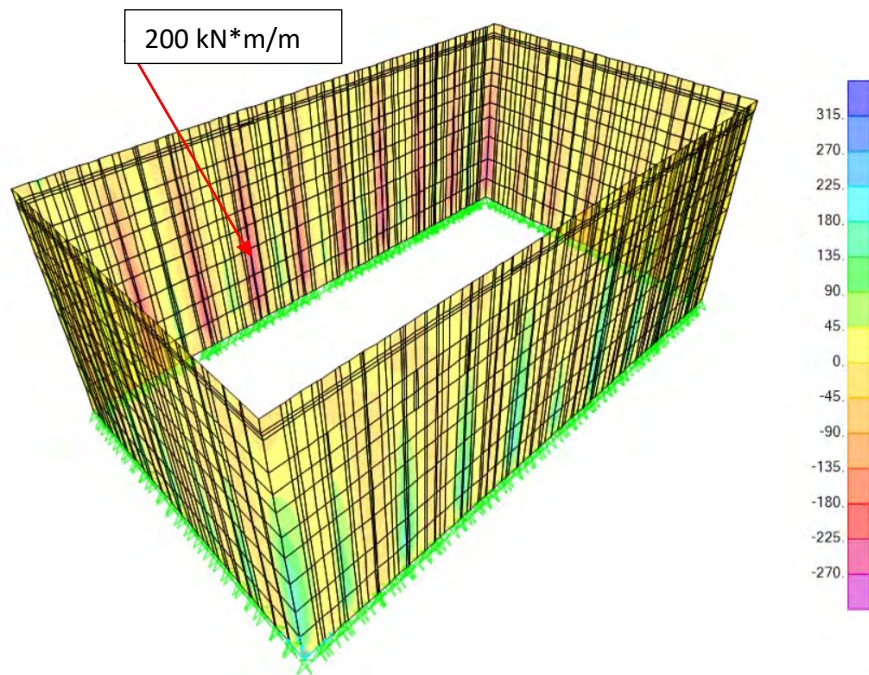


Figura 200 – M11 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del momento torsor M12:

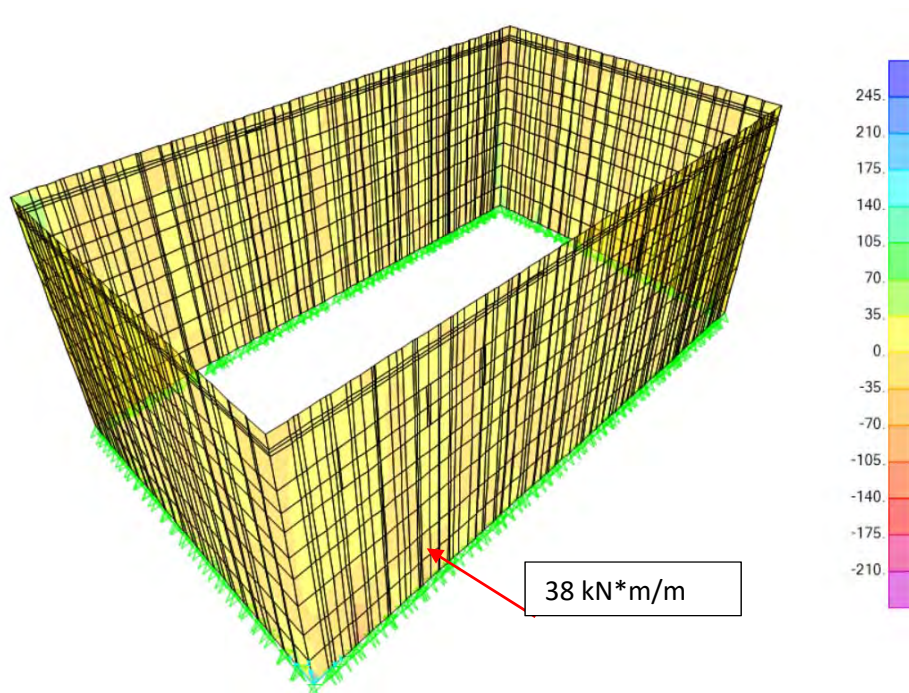


Figura 201 – M12 ELS Seno de la ola



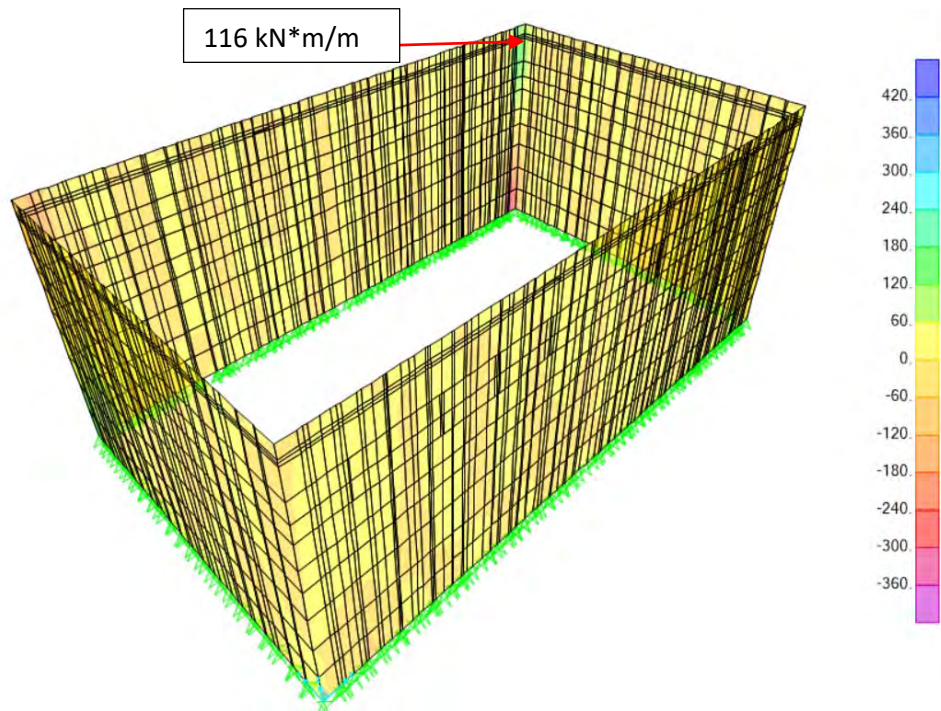


Figura 202 – M12 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje horizontal:

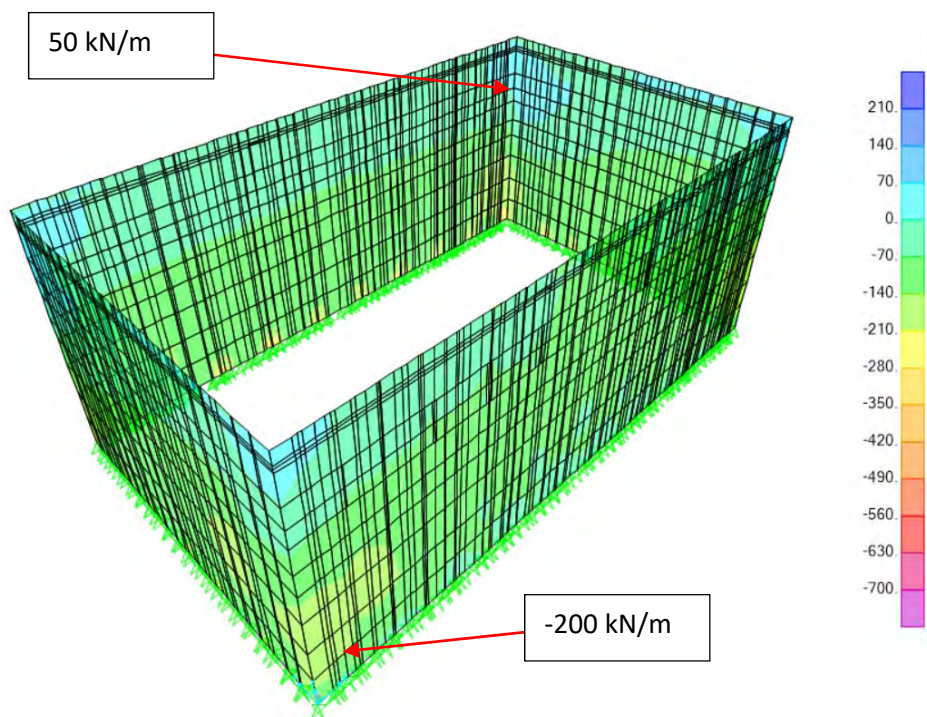


Figura 203 – F11 ELS Seno de la ola

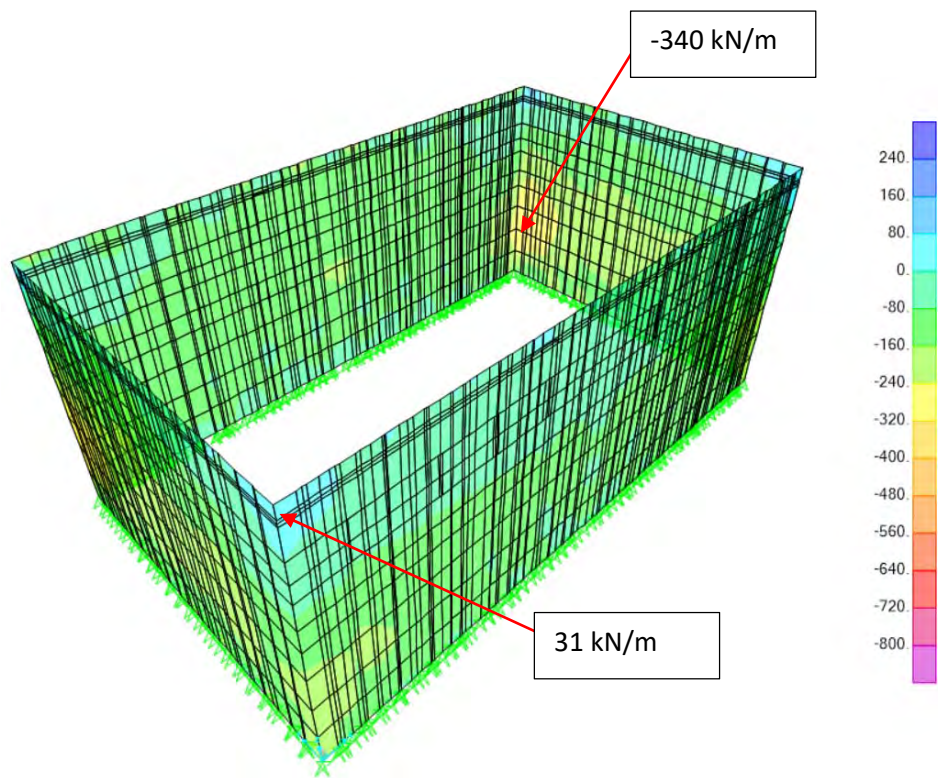


Figura 204 – F11 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes exteriores del axil según el eje vertical:

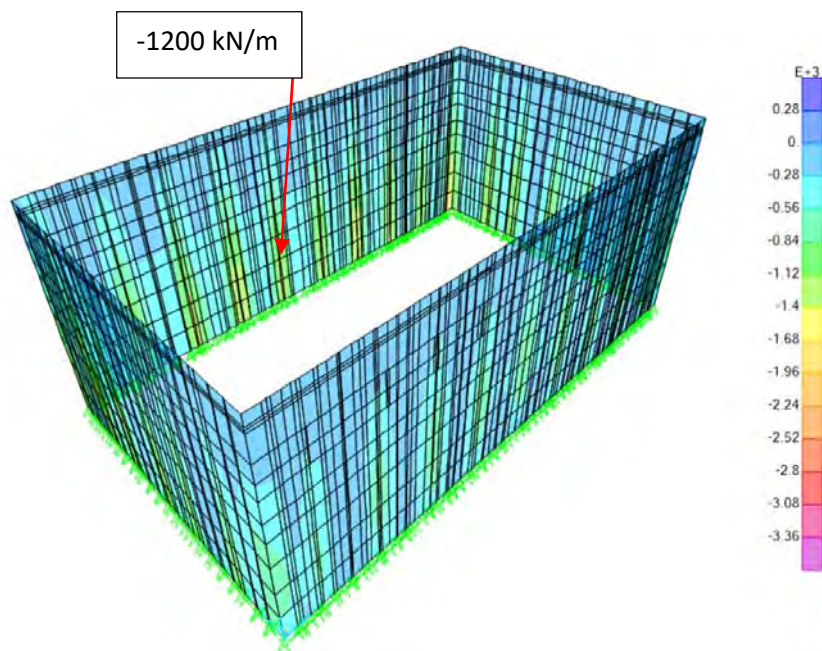


Figura 205 – F22 ELS Seno de la ola



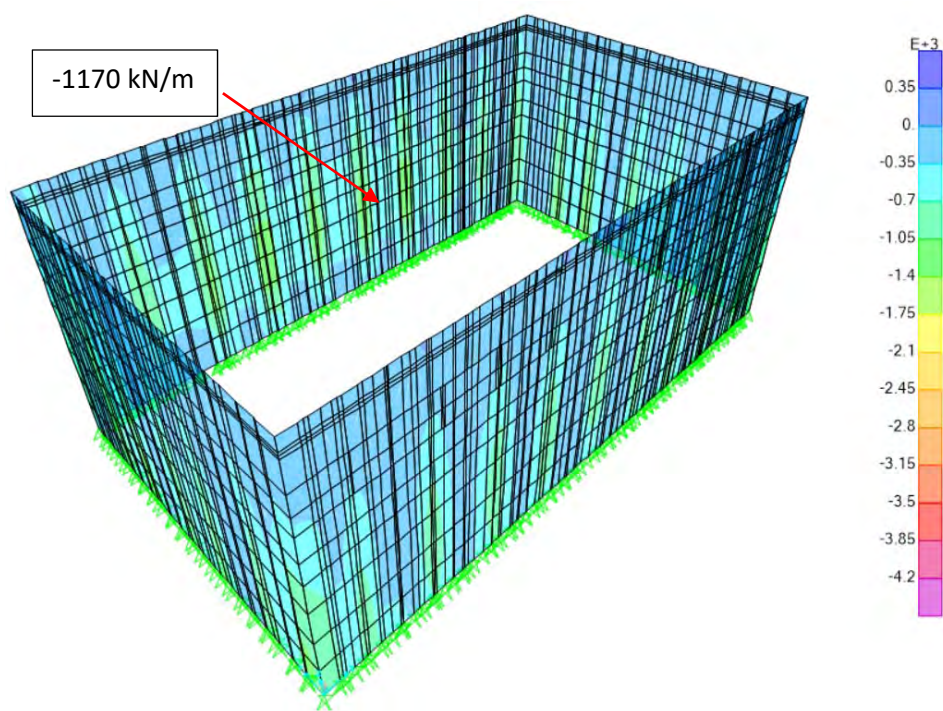


Figura 206 – F22 ELS Cresta de la ola

### 3.2.2. Paredes interiores

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje horizontal:

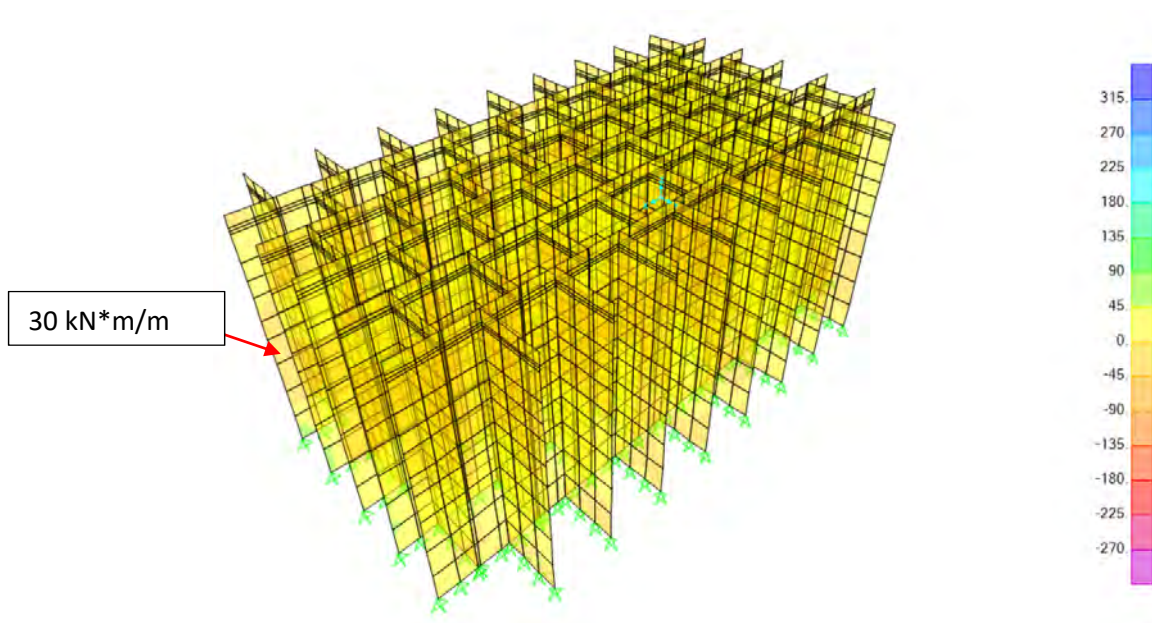


Figura 207 – M22 ELS Seno de la ola



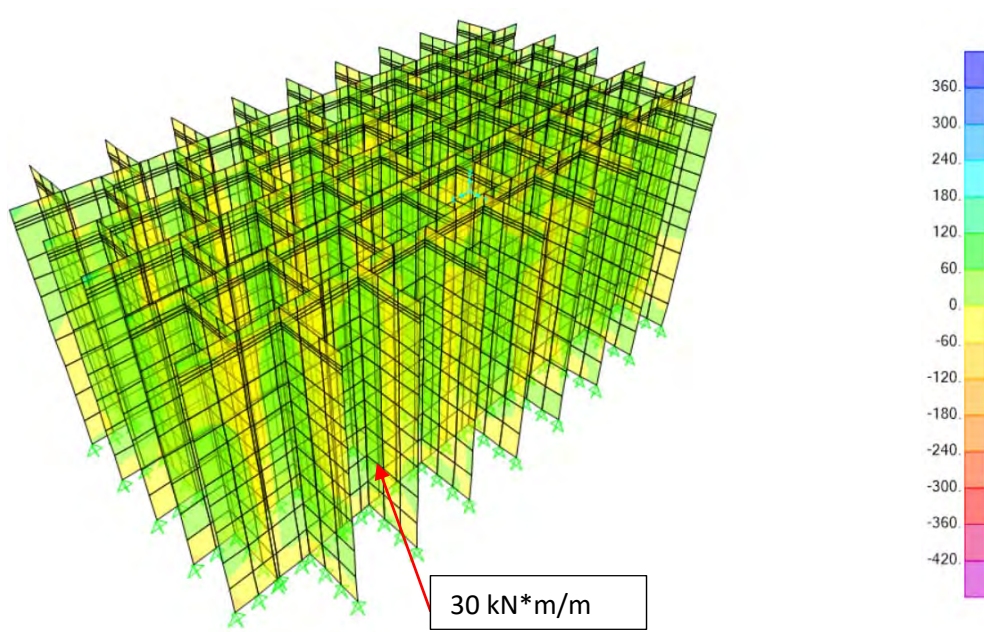


Figura 208 – M22 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento según el eje vertical:

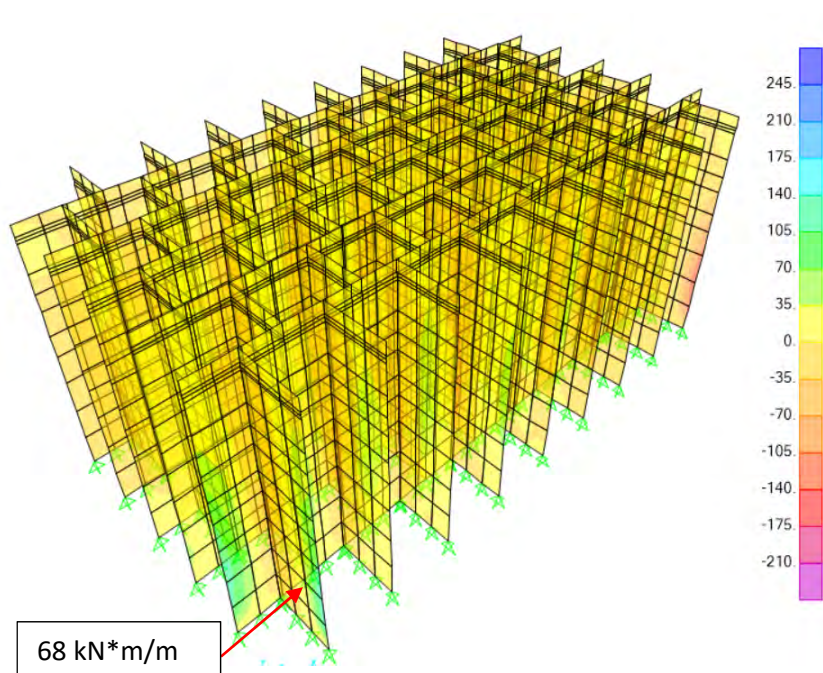


Figura 209 – M11 ELS Seno de la ola

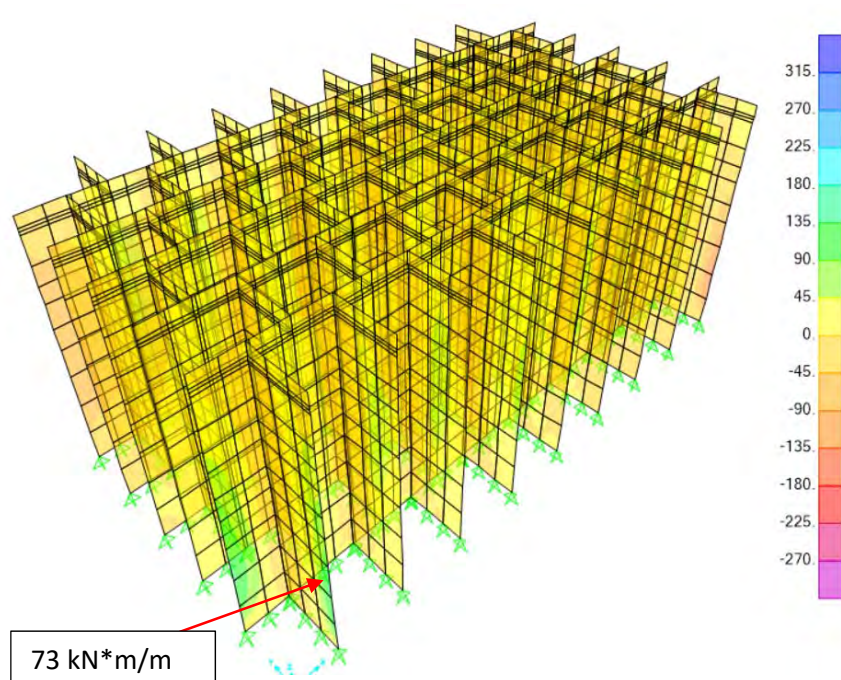


Figura 210 – M11 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del momento torsor M12:

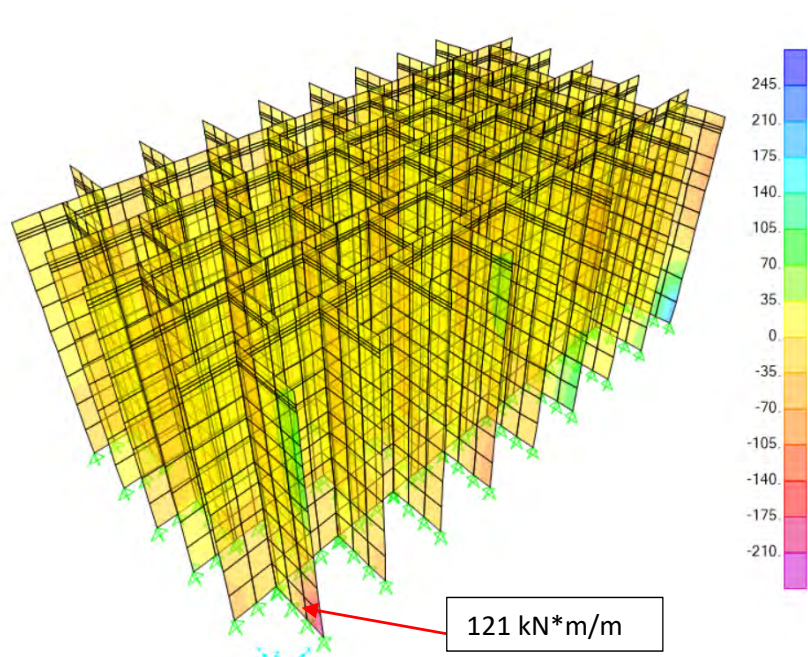


Figura 211 – M12 ELS Seno de la ola



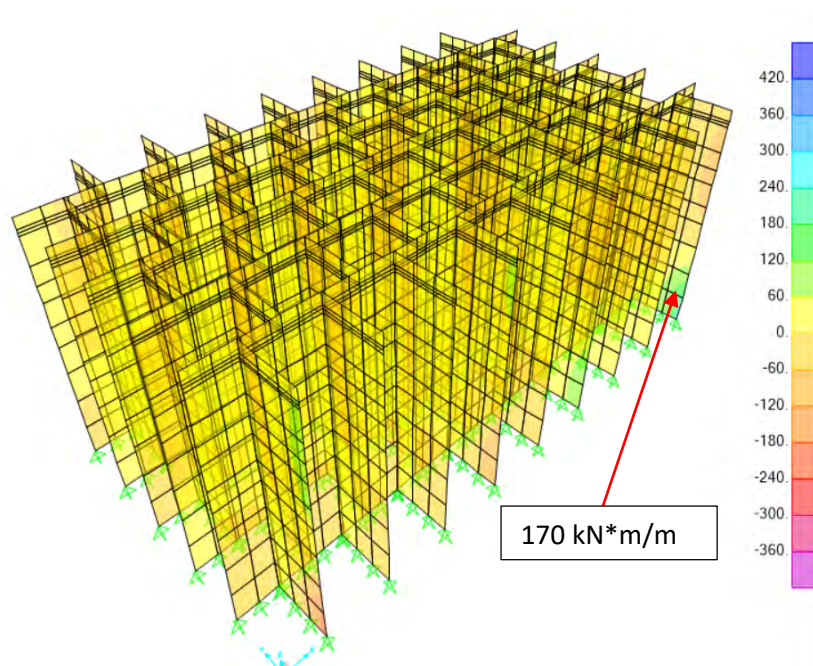


Figura 212 – M12 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje horizontal:

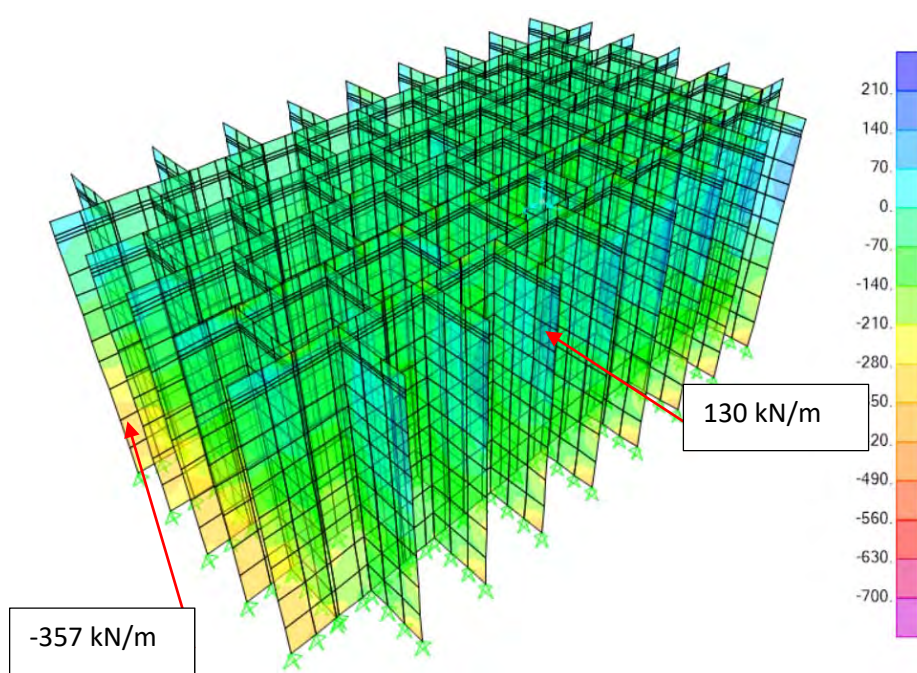


Figura 213 – F11 ELS Seno de la ola



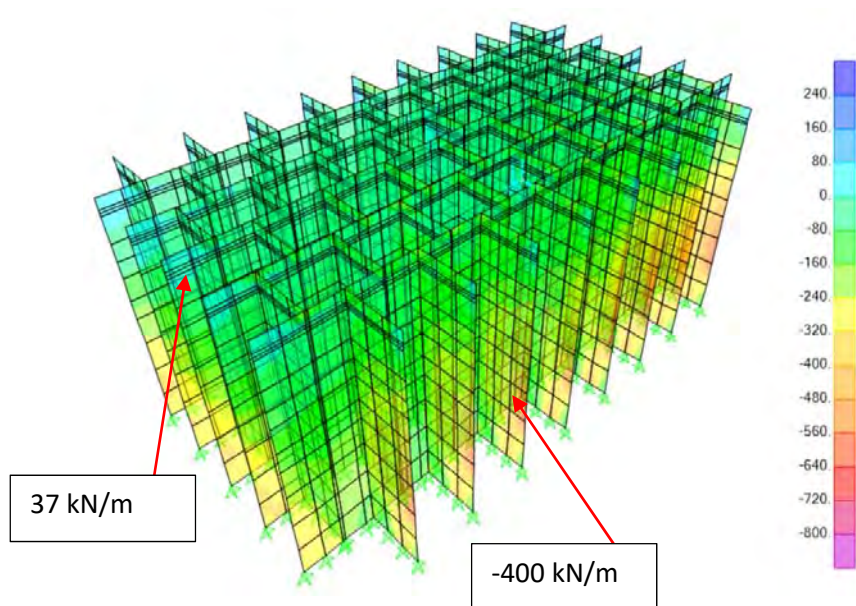


Figura 214 – F11 ELS Cresta de la ola

Los resultados para las paredes interiores del axil según el eje vertical:

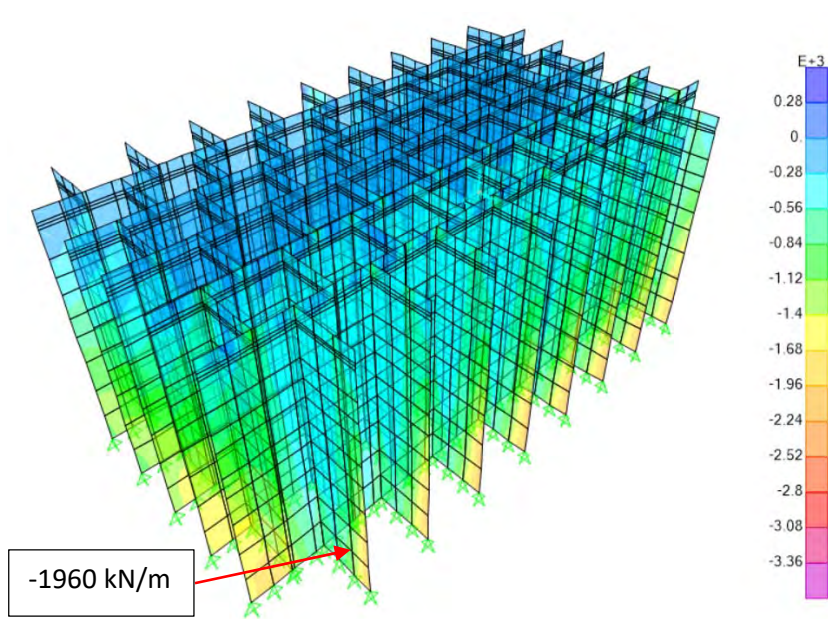


Figura 215 – F22 ELS Seno de la ola

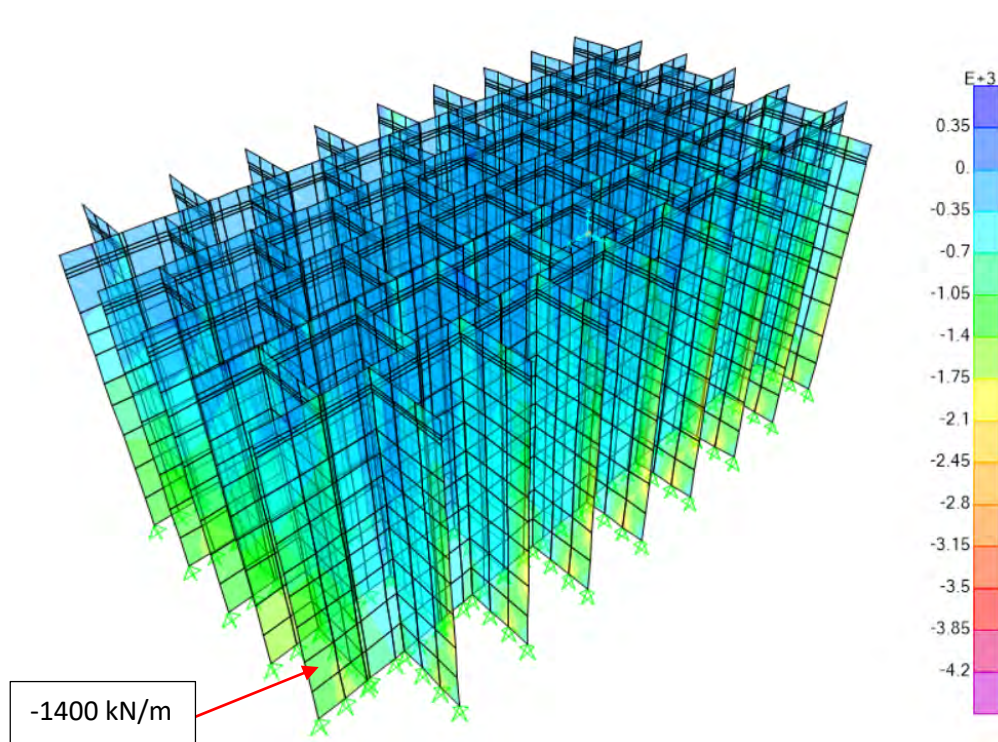


Figura 216 – F22 ELS Cresta de la ola

### 3.2.3. Resumen ELS celdas circulares optimizadas

Paredes exteriores					
	M22 (kN*m/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	F11 (kN/m)	F22 (kN/m)
ELS Cresta de la ola	70	200	116	31/-340	-1170
ELS Seno de la ola	140	130	38	50/-200	-1200

Paredes interiores					
	M22 (kN*m/m)	M11 (kN*m/m)	M12 (kN*m/m)	F11 (kN/m)	F22 (kN/m)
ELS Cresta de la ola	30	73	170	37/-400	-14007
ELS Seno de la ola	30	68	121	130/-357	-1960